

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra stavebních hmot a diagnostiky staveb

Možnosti vnitřního ošetřování vysokohodnotného betonu
prostřednictvím recyklátu

A possibility of internal curing of HPC using recycled concrete or
bricks

Student: Bc. Bohdan Sousedík

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.

Ostrava 2018

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Bohdan Sousedík**
Studijní program: **N3607 Stavební inženýrství**
Studijní obor: **3607T021 Stavební hmoty a diagnostika staveb**
Téma: **Možnosti vnitřního ošetřování vysokohodnotného betonu
prostřednictvím recyklátu**
A possibility of internal curing of HPC using recycled concrete or bricks
Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Vysokohodnotný beton má tak hutnou strukturu, že během tvrdnutí nemůže ošetřovací voda pronikat do centrálních oblastí průřezu betonu a hydratace cementu se zastavuje. Možností jak situaci zlepšit je vnitřní ošetřování betonu. Do betonu se přidá pórovité kamenivo nasáklé vodou, která se v průběhu hydratace uvolňuje a umožňuje tak hydrataci cementových zrn ve vnitřních oblastech průřezu betonu. Perspektivní by mohlo být použití nasáklého betonového recyklátu.

Cíle práce jsou následující:

- Provést potřebné zkoušky betonového a/nebo cihelného recyklátu
- Připravit vysokohodnotné jemnozrnné betony s běžným kamenivem
- Nahradit části běžného kameniva nasáklým betonovým či cihelným recyklátem stejné frakce a porovnat vývoj mechanických vlastností
- Pokusit se postihnout změny mikrostruktury betonu

Seznam doporučené odborné literatury:

Aitcin, P.-C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT 2005
Aitcin, P.-C.: Internal curing, proc. of Int. Conf. NTCC 2008
Pytlík, D., Bílek, V.: Two options of self-curing of High Performance Concrete, Sborník konf. BD 2017

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2018

Datum odevzdání: 30.11.2018


doc. Ing. Vlastimil Bílek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě...29.11.2018.....

.....Sousloví.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě. 29.11.2018

.....


podpis studenta

Poděkování

Rad bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Vlastimilu Bílkovi Ph.D. za odborné rady a vedení při tvorbě mé práce. Dále bych chtěl také poděkovat zaměstnancům laboratoře a mým spolužákům za pomoc při výrobě vzorků.

Anotace

Diplomová práce je zaměřena na možnosti vnitřního ošetřování vysokohodnotného betonu pomocí recyklátu. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části jsou popsány druhy a složení vysokohodnotného betonu. Následující část je věnována trvanlivosti a smrštění vysokohodnotného betonu. V poslední části teoretické poloviny práce jsou uvedeny způsoby ošetřování betonu.

V praktické části byly namíchány záměsi s různým obsahem betonového recyklátu a vody s několika kontrolními záměsemi. U všech vzorků probíhalo měření smrštění a po 28 dnech byly vzorky podrobeny zkoušce pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Z výsledků se ukazuje, že přidání suchého recyklátu do betonu nepřináší téměř žádnou změnu v poměrné deformaci a pevnosti. Přidáním předem nasáklého betonového recyklátu bylo docíleno snížení smrštění a mírného nárůstu pevností, ale tyto rozdíly byly velmi malé.

Klíčová slova:

Vysokohodnotný beton, vnitřní ošetřování, betonový recyklát, smrštění,

Abstract

My dissertation essay concerns options for high performance (HP) concrete internal treatment by application of recycled materials. The dissertation consists of a theoretical and a practical part. In the theoretical part, varieties of HP concrete and its composition are described and account of HP concrete's contraction amount and durability is given. The theoretical part's conclusion refers to methods for treatment of concrete.

The practical part gives account of experiments with concrete mixtures of varying content of recycled material and water. All samples were subject of contraction measurements and after the lapse of 28 days, the samples were put to tests as regarded flexure tensile and compression resistance. The experiments evidenced that recycled material admixtures hardly affect relative deformation and strength characteristics of concrete. Admixtures of waterlogged recycled material cause a slight decrease of contraction amount and some increase in overall strength. Nonetheless, the differences are insubstantial.

Key Words:

High Performance Concrete, Internal Treatment, Recycled Concrete, Contraction

Obsah

Seznam použitého značení.....	4
1 Úvod.....	5
2 Vysokohodnotný beton (HPC).....	7
2.1 Vysokopevnostní beton (HSC)	7
2.2 Lehčený vysokopevnostní beton	8
2.3 Samozhutnitelný beton (SSC)	8
2.4 Vysokohodnotný vláknobeton	9
3 Složení vysokohodnotného betonu	10
3.1 Cement	10
3.2 Voda	10
3.3 Vodní součinitel	11
3.4 Kamenivo	12
3.4.1 Drobné kamenivo.....	12
3.4.2 Hrubé kamenivo.....	12
3.5 Příměsi.....	12
3.5.1 Křemičité úlety	13
3.5.2 Popílek	13
3.5.3 Vysokopecní struska	13
3.5.4 Metakaolín	14
3.5.5 Jemně mletý vápenec	14
3.5.6 Ostatní příměsi.....	14
3.6 Přísady.....	14
4 Trvanlivost vysokohodnotného betonu.....	16
4.1 Struktura na mikroskopické úrovni	16
4.2 Struktura na makroskopické úrovni	17

5	Smrštění betonu	18
5.1	Teplotní smrštění.....	18
5.2	Plastické smrštění.....	18
5.3	Smrštění odpařováním vody	18
5.4	Chemické smrštění	19
5.5	Autogenní smrštění	19
5.6	Smrštění vysokohodnotných betonů	19
6	Ošetřování betonu	21
6.1	Ošetřování pomocí vody	21
6.2	Aplikace povrchové vrstvy	21
6.3	Vliv ošetřování na pevnost.....	21
6.4	Vliv ošetřování na trvanlivost.....	22
7	Vnitřní ošetřování betonu	24
8	Použití zkoušení a metodika výroby těles.....	26
8.1	Metodika přípravy těles.....	26
8.2	Volba přípravy recyklátu.....	27
8.3	Konzistence čerstvé malty.....	27
8.4	Měření smrštění těles	27
8.5	Měření pevnosti.....	28
9	Suroviny pro výrobu betonu	29
9.1	Kamenivo	29
9.2	Cement	29
9.3	Voda	29
9.4	Přísady.....	29
9.5	Příměsi.....	29
9.6	Betonový recyklát	30
9.6.1	Zkouška zrnitosti.....	30

9.6.2	Zkouška objemové hmotnosti a nasákavosti	32
9.6.3	Zkouška sypaných hmotností a mezerovitosti.....	32
10	Receptury betonových záměsí	34
11	Smrštění běžného betonu	37
11.1	Vliv ošetřování na poměrnou deformaci	39
11.2	Vliv vodního součinitele na poměrnou deformaci	41
12	Pevnost běžného betonu.....	42
12.1	Vliv ošetřování na pevnost betonu	42
13	Konzistence a kontrola hmotnosti vysokohodnotného betonu	44
14	Smrštění vysokohodnotného betonu	46
14.1	Smrštění betonů s přídavkem suchého recyklátu	48
14.2	Smrštění betonů s nasáklým recyklátem	50
14.3	Vyhodnocení smrštění	51
15	Pevnost vysokohodnotných betonů	52
15.1	Vyhodnocení pevnosti HPC	53
16	Závěr	56
	Seznam použité literatury	58
	Seznam obrázků	60
	Seznam grafů	61
	Seznam tabulek	62
	Seznam příloh	63

Seznam použitého značení

HPC	Vysokohodnotný beton	
HSC	Vysokopevnostní beton	
SSC	Samozhutnitelný beton	
UHPC	Ultravysokohodnotný beton	
LC	Lehčený beton	
CSH	Hydratované kalcium-silikáty	
CEM I	Portlandské cement	
CEM II	Směsný portlandský cement	
CEM III	Vysokopecní cement	
w	Vodní součinitel	
ρ_{ps}	Objemová hmotnost vysušeného kameniva	[kg/m ³]
N	Nasákavost	[%]
ρ_w	Hustota vody	[kg/m ³]
m_d	Hmotnost vysušeného kameniva	[kg]
m_c	Hmotnost pyknometru s vodou	[kg]
m_b	Hmotnost vzorku s vodou v pyknometru	[kg]
m_a	Hmotnost nasáklého kameniva	[kg]
ρ_{vs}	Volně sypaná objemová hmotnost	[kg/m ³]
M	Mezerovitost	[%]

1 Úvod

Díky pokročilé stavební chemii se i pro běžnější účely volí použití vysokohodnotných betonů, které jsou sice svou pořizovací cenou obvyklé nákladnější, ale poskytují odolnější konstrukce, které vyžadují menší investice během životnosti konstrukce. Jeden z nejvýznamnějších aspektů, které snižují odolnost konstrukce, je nedostatečně hutný povrch. Nehutný povrch umožňuje vstup korozivních látek do vnitřních částí betonu, kde má hlavně za následek rychlou korozi a následný kolaps výztuže. Správně připravené vysokohodnotné betony mají hutný povrch, který zabraňuje vstup do jeho vnitřních částí, ale jak je známo, betony s nízkým vodním součinitelem mají vysokou tendenci ke smršťování. Smrštění má za následek vytváření smršťovacích trhlin v betonu a opět díky němu mohou korozivní látky pronikat do betonu. Vzhledem k tomu, že hutná povrchová struktura brání vnikání ošetřovací vody do betonu, je vhodné ji přidat a udržet pomocí příměsí. Jednou z možných příměsí se zdá být betonový recyklát, který je porézní a mohl by ošetřovací vodu přijmout a uvolňovat v pozdějších fázích hydratace. Navíc tento materiál je velmi dobře dostupný a bylo by vhodné najít jeho další smysluplné využití jakožto recyklovaného materiálu.

V teoretické části diplomové práce je nejprve pro úplnost nastíněno rozdělení vysokohodnotných betonů a jsou uvedeny složky používané k jeho výrobě. Hlavní součástí je pak porovnání smrštění běžných a vysokohodnotných betonů a jejich vhodné způsoby ošetřování, je zde také popsáno vnitřní ošetřování betonu.

V úvodu praktické části jsou uvedeny použité zkušební metody a popsány suroviny. Dále je pak provedena analýza betonového recyklátu ve smyslu nasákavosti, objemové hmotnosti, křivky zrnitosti apod. Následně proběhlo míchání třech záměsí se snižujícím se vodním součinitelem, aby bylo prokázáno, že s nižším vodním součinitelem roste smrštění betonu. Tělesa vyrobená z těchto záměsí byla uložena v různém ošetřovacím prostředí pro ukázkou významnosti ošetřování. V hlavní části praktické části bylo vyrobeno celkem třináct záměsí. Jednalo se o jednu referenční záměs k šesti recepturám, do kterých bylo přidáno různé množství betonového recyklátu. Poté byly namíchány tři kontrolní záměsi bez přidaného recyklátu. Poslední tři záměsi obsahovaly referenční záměs k betonům s nasáklým recyklátem v záměsové vodě.

Hlavní zkoumanou částí bylo měření smrštění těles vyrobených z těchto receptur se srovnáním s referenčními tělesy a měření pevností v tahu a tlaku a opět porovnání, zda nedochází k výraznému ovlivnění pevnosti díky přidanému betonovému recyklátu.

2 Vysokohodnotný beton (HPC)

Pro vysokohodnotný beton není možné zavést jednotnou definici, ale dá se říci, že se jedná o betony, u kterých je jedna, či více vlastností vylepšena oproti betonům pro běžné použití a zároveň válcová pevnost těchto vysokohodnotných betonu je vyšší než 60 MPa. Nejběžněji používané vysokohodnotné betony jsou vysokopevnostní betony, ale existuje celá další řada dalších vysokohodnotných betonů, od běžně používaných samozhutnitelných betonů, po speciální použití jako je těžký vysokohodnotný beton [3].

Problémem vysokohodnotného betonu bývají jeho vyšší náklady na realizaci, díky vyšší ceně za objemovou jednotku, ale celkové náklady v delším časovém horizontu mohou být stejné nebo dokonce nižší, protože vhodně použitý vysokohodnotný beton má nižší nároky například na údržbu [3].

Dalším aspektem, který hovoří ve prospěch vysokohodnotného betonu, je menší zátěž na životní prostředí, protože se mnohem lépe využívají pojivé vlastnosti cementu, a tedy dochází k nižší spotřebě cementu, který má významný podíl na vypouštění oxidu uhličitého do ovzduší [3].

2.1 Vysokopevnostní beton (HSC)

Obecně se mezi vysokopevnostní betony řadí betony třídy C 55/67 a vyšší. Při výrobě vysokopevnostních betonů bývají využívány čtyři základní postupy. Vodní součinitel pro výrobu HSC se pohybuje mezi 0,3 až 0,4, což je umožněno použitím účinných superplastifikátorů. Dále se používají minerální příměsi v podobě křemičitých úletů a jemně mleté strusky, metakaolinu apod. Velmi důležité je dbát na správné provedení ošetřování, aby se omezil vznik autogenních smršťovacích trhlin, které vznikají ve větší míře díky nízkému vodnímu součiniteli. Poslední charakteristickou vlastností pro HSC je užití drceného kameniva s vysokou pevností v tlaku a dobrou soudržností s cementovou maticí jako je čedičové nebo žulové kamenivo [2].

2.2 Lehčený vysokopevnostní beton

Jedná se o betony s objemovou hmotností nižší než 2000 kg/m^3 , které však mají pevnostní třídu LC 50/55 a vyšší. Těchto vlastností se dá docílit přidáním porézního kameniva, u kterého však nastává problém s absorpcí vody během míchání. Další možností je využití písku s nízkou objemovou hmotností. Ke zlepšení zpracovatelnosti, zvýšení pevnosti a snížení rizika rozmísení se v těchto betonech používají relativně vysoké dávky mikrosiliky, případně elektrárenského popílku [3].

Výhody lehčených vysokopevnostních betonů jsou nejen v nižší objemové hmotnosti, ale také vykazují menší smrštění během prvních dnů hydratace. Dále tyto betony mají zvýšenou odolnost proti únavovému zatížení a mají lepší tepelné charakteristiky, jako je odolnost proti náhlé změně teploty [3].

2.3 Samozhutnitelný beton (SSC)

Samozhutnitelný beton byl původně vyvinut proto, aby bylo omezeno působení lidského faktoru během jeho hutnění, a tedy nedocházelo k poruchám v místech, kde beton nebyl dobře zhutněn. K zhutnění samozhutnitelného betonu dochází, pouze jeho vlastní vahou. Ve velké míře je uplatňován pro prefabrikaci a pro konstrukce, kde se nachází velké množství vyztužení a klasické provedení hutnění by bylo náročné. Poskytuje také velmi dobré povrchy u pohledových betonů bez výrazných pórů.

Složením je SSC velmi podobný vysokohodnotným betonům. Vysoká míra tekutosti se docílí použitím superplastifikátorů na bázi polykaboxylových esterů, sulfonovaných naftalen-formaldehydových kondenzátů nebo sulfonovaných melamin-formaldehydových pryskyřic. Dále se pro lepší tekutost používají jemně mleté příměsi jako je ve většině případů velmi jemně mletý vápenec, popílek anebo vysokopecní struska. Vhodná míra viskozity se také zajišťuje užitím kameniva se spojitou křivkou zrnitosti [2].

Samozhutnitelný beton je relativně citlivý na dobu zpracovatelnosti, která nebývá příliš dlouhá, a proto se někdy používá dvojité dávkování plastifikační přísady. Při jeho transportu hrozí nebezpečí segregace kameniva vlivem vibrací a otřesů. Jako i ostatní vysokohodnotné betony má nízký vodní součinitel a vysokou dávku cementu, proto se

provádí ošetřování nejčastěji vodní mlhou a opatřuje se nástřikem, který zabraňuje odpařování vody z povrchu [8].

2.4 Vysokohodnotný vláknobeton

Pro zvýšení rázové pevnosti a houževnatosti se používají jak u běžných betonů, tak i u vysokohodnotných betonů vlákna. Na rozdíl od běžného betonu se u vysokohodnotných betonů osvědčilo používat pouze vlákna vysokých pevností v tahu, jako jsou ocelová vlákna nebo uhlíková vlákna. Užití skleněných nebo plastových vláken není výhodné, protože na rozdíl od běžného betonu, kde porušení nastává na hranici vlákna a matrice, se u vysokohodnotných betonů vlákno poruší v jeho průřezu, protože je velmi silně ukotveno v matrici, a tedy vlákna nižších pevností nepřinášejí žádné benefity. Z ocelových vláken jsou nejvhodnější krátká vlákna, která se dobře rozptýlí v matrici a poskytují rovnoměrné rozložení [3].

U vysokohodnotných betonů se také mohou použít plastová vlákna malých rozměrů, jako jsou polypropylenová vlákna, která nemají podíl na zvýšení pevnosti, ale poskytují lepší požární odolnost. Při požáru vlákna vyhoří a poskytnou místo pro expandující vodní páru, která nezpůsobuje odstřelování povrchových vrstev betonu [2].

3 Složení vysokohodnotného betonu

U vysokohodnotných betonů je kladen větší důraz na kvalitu použitých základních složek, jako je cement, voda a kamenivo, než je tomu u betonů pro běžná použití. Dále se ve větší míře používají přísady a příměsi zlepšující požadované vlastnosti, avšak je nutné volit takové, které nejsou příliš drahé, aby výroba vysokohodnotného betonu byla stále ekonomická [3].

3.1 Cement

Nejběžněji používaným druhem cementu pro výrobu HPC jsou portlandské cementy CEM I, tedy cementy, které obsahují více než 95 % slínku. Využívá se cementů vyšších pevnostních tříd s vysokou mírou jemnosti mletí, kterými jsou cementy CEM I 42,5 a CEM I 52,5. Použití portlandského cementu se jeví jako vhodné v důsledku toho, že vysokohodnotné betony s tímto druhem cementu mají dobrou dobu zpracovatelnosti a jejich nárůst pevnosti také často vyhovuje požadavkům [4].

Pro speciální účely jako jsou masivní konstrukce, kdy je požadován pomalejší vývin hydratačního tepla, je možné použít cementy CEM II (směsný portlandský cement) a CEM III (vysokopecní cement) [4].

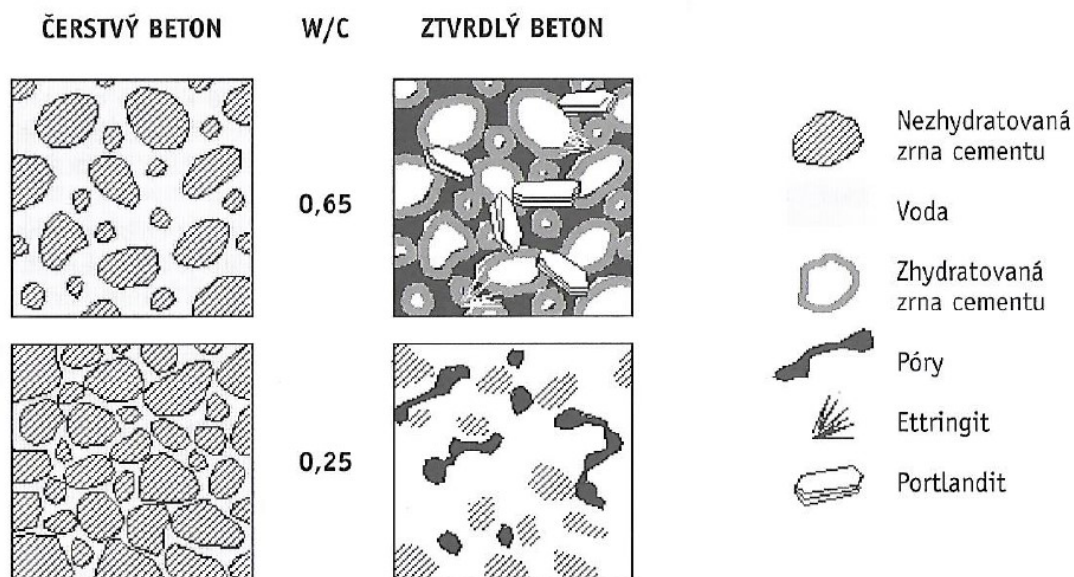
Obvyklé dávkování pro praktické použití se pohybuje mezi 380 kg/m^3 a 550 kg/m^3 . Navýšení dávky cementu nad hodnotu 700 kg/m^3 se používá výjimečně, pouze u speciálních betonů jako je UHPC [4].

3.2 Voda

Pro vysokohodnotný beton se používá stejná voda jako u běžných betonů, tedy voda, která neobsahuje žádné nečistoty, které by ovlivňovaly tuhnutí a tvrdnutí betonu. Mnohem důležitějším faktorem je obsah vody v poměru k pojivu.

3.3 Vodní součinitel

Jednou z nejdůležitějších vlastností, která má vliv na výslednou pevnost betonu, je poměr mezi pojivem a vodou. Čím nižší je tento poměr, tím je výsledná soustava produktů hydratace cementu hutnější, jak je to schématicky znázorněno na obrázku 1 a díky hutnější struktuře beton nabývá vyšší pevnosti. Ideální poměr mezi cementem a vodou je mezi 0,23 a 0,25, kdy je v soustavě obsaženo teoreticky dostatečné množství vody, aby mohly zhydratovat veškerá zrna cementu. Směsi s takto nízkým vodním součinitelem jsou velice špatně zpracovatelné, ale díky účinným plastifikátorům není v dnešní době problém vyrobit samozhutňující beton o takto nízkém vodním součiniteli. Ve speciálních betonech, které nabývají ultravysokých pevností se dokonce vodní součinitel může pohybovat i mezi 0,1 a 0,2 [3].



Obrázek 1: Schéma betonu s nízkým a vysokým vodním součinitelem [3]

Dále je třeba si uvědomit, že do pojiva nepatří pouze cement, ale také další latentně hydraulické příměsi, jakou jsou popílký nebo vysokopecní struska. Tyto materiály také vyžadují pro svou hydrataci vodu, a tu je nutné dále připočítat do výsledného vodního součinitele.

3.4 Kamenivo

Oproti běžným betonům je nutné brát větší zřetel na výběr kameniva. Obecně se dá říct, že se pro výrobu HPC používají kameniva, která pocházejí z hornin o spodní hranici pevnosti v tlaku 120 až 140 MPa, protože matrice se tlakem neporuší a k poruchám dochází hlavně na místech styku matrice a kameniva. Maximální zrno kameniva bývá obvykle 16 mm, výjimečně se používá do velikosti zrna 22 mm. Všeobecně jsou vhodná zrna, která mají pravidelný tvar, a proto se sleduje tvarový index kameniva. Velmi důležité je také sledovat mineralogické složení, zda nejsou obsaženy v kamenivu nečistoty, které by měly za následek předčasné porušení [4].

3.4.1 Drobné kamenivo

Jako drobné kamenivo se používá běžně říční těžené kamenivo. Užití drobného drceného kameniva je také vhodné, možná dokonce i výhodnější, ale jeho dostupnost není tak dobrá. Používá se hrubší drobné kamenivo, protože vysokohodnotné betony mají velké dávky příměsí a cementu, a proto není nutné použít kamenivo s nízkými frakcemi pro lepší zpracovatelnost. Dalším důvodem, proč není vhodné přidat další drobné kamenivo s nízkou frakcí je, že absorbuje velké množství vody, což je pro HPC nevhodné [3].

3.4.2 Hrubé kamenivo

Jako hrubé kamenivo se používá hlavně kamenivo drcené z kompaktních hornin (například vápenec) anebo z magmatického přeměněného kameniva, jako je žula, gabro nebo diabas. Velmi významné je, aby zrna měla kubický nebo kulovitý tvar a nebylo přítomné velké množství podlouhlých nebo plochých zrn, která se snadno poruší. Navíc tato nekubická zrna značně redukuje zpracovatelnost. Za nejvhodnější kamenivo se považuje kamenivo, které bylo promyto a opracováno během postupu ledovce, a tedy v něm nejsou přítomna málo pevná zrna a vodou byla odnesena prachová část [3].

3.5 Příměsi

Přesto, že vysokohodnotný beton může být připraven pouze s pojivem na bázi cementu, je z ekonomického hlediska a z pohledu reologie betonu výhodné použít pucolánové, latentně hydraulické příměsi anebo příměsi s funkcí filleru.

3.5.1 Křemičité úlety

Křemičité úlety vznikají v elektrických pecích při výrobě křemíku a jeho slitin jako plynná forma SiO , která je odsávána a zachytávána na odlučovačích, kde reaguje a vytváří skelnou fázi SiO_2 . Částice mají kulovitý tvar a asi sto násobně větší specifický povrch než cement. V cementové matrici reaguje s volným portlanditem za vzniku pojivých složek, které jsou podobné jako při tuhnutí a tvrdnutí cementu. Dále mají pozitivní vliv na reologii, tedy ztekucují lepivé čerstvé betony, a zároveň stabilizují čerstvý beton, aby nedocházelo k segregaci a krvácení. Jejich výhody lze také pozorovat při hydrataci cementu, kde fungují jako nukleační jádra. Všechny tyto vlastnosti mají za výsledek tvorbu hutnějšího cementového kamene s nižší pórovitostí. Obvyklé dávkování bývá mezi 3 až 10 %, ale teoreticky maximální množství, které se dá přidat do betonu k reakci s portlanditem je 30 % [3].

3.5.2 Popílek

Další pucolánovou příměsí je popílek, který je zachytáván v odlučovačích v elektrárnách při spalování uhlí. Na rozdíl od křemičitých úletů má popílek často velmi rozdílné chemické složení a tvar částic, a tedy všechny druhy popílků nejsou vhodné do betonu. Používají se převážně popílky třídy F (popílky s nízkým obsahem vápníku) a popílky třídy C (popílky s vysokým obsahem vápníku). Popílek vylepšuje konzistenci, ale mírně navyšuje spotřebu vody. Vzhledem k tomu, že má podobnou křivku zrnitosti jako cement, funguje v čerstvém betonu jako filler. Popílky snižují počáteční pevnosti betonu, ale díky pozvolnější reakci snižují hydratační teplo, a proto jsou vhodné do betonů pro masivní konstrukce. Do betonů se obvykle přidává okolo 15 % popílku. Pro užití popílku hovoří hlavně jejich cena jako náhražka cementu, avšak vysokohodnotné betony pouze s přídavkem popílku nemívají vyšší pevnosti než 100 MPa [3] [4].

3.5.3 Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je vedlejší produkt při výrobě surového železa. Vzhledem k tomu, že oceláři se snaží docílit co nejnižší teploty tavení železa, přidává se stále množství surovin, ze kterých struska vzniká, a její složení moc nekolísá. Aby byla struska latentně hydraulická, je potřeba v ní udržet skelnou fázi. Struska se po opuštění z pece rychle chladí nalitím do vody, ve které vzniká hrubý písek, který se následně mele. Struska obvykle mívá větší zrna než cement, ale rozdíl není výrazný a také přispívá k lepší tekutosti čerstvého betonu. Stejně jako u betonů s popílky, je vývin tepla a

počátečních pevností nižší po přidání mleté vysokopeční strusky. Strusku je možné dávkovat do betonu v obvyklé dávce mezi 15 a 30 %, ale experimentálně byly vytvořeny záměsi až s 60 % strusky [3] [4].

3.5.4 Metakaolín

Vyrábí se pálením kaolínových minerálů při teplotě 450 až 800 °C. Metakaolín má asi dvojnásobnou schopnost pucolánové reakce než křemičité úlety, ale jeho velikost zrn je obvykle desetinásobná než u křemičitého úletu. Podobně jako křemičité úlety stabilizuje beton a poskytuje zahuštění výsledného cementového tmele [4].

3.5.5 Jemně mletý vápenec

Jemně mletý vápenec se řadí mezi inertní příměsi bez pucolánové aktivity, ale u betonů přináší benefity ve formě stabilizace čerstvého betonu, funguje jako filler a napomáhá sjednocení barevnosti betonu [9].

3.5.6 Ostatní příměsi

Další příměsí, kterou je možné přidat ze zástupců aktivních látek je kyselina křemičitá, také někdy označována jako nanosilika. Jedná se o prakticky 100 % oxid křemičitý ve skelné podobě, ale na rozdíl od mikrosiliky jsou její zrna asi desetkrát menší a také se jedná o velmi drahou příměs. Účinky kyseliny křemičité jsou velmi podobné jako účinky křemičitých úletů [4] [9].

Z inertních příměst se běžně přidávají mleté kamenné moučky, které mají podobné vlastnosti a výhody jako jemně mletý vápenec [4].

3.6 Přísady

Do vysokohodnotných betonů se používají všechny druhy přísad do betonu, jako jsou urychlující, zpomalující přísady nebo například provzdušňující přísady. Volba přísad závisí na požadavcích na daný beton.

Avšak hlavním zástupcem přísad, který je HPC vždy přítomen, je plastifikátor. Bez přítomnosti ztekutující přísady by prakticky běžnými způsoby nebylo možné vysokohodnotný beton o nízkém vodním součiniteli ztuhnout a jeho použití by bylo velmi omezené, ne-li nemožné. V závislosti na požadované pevnosti se používají levnější, ale méně účinné plastifikátory, anebo pokud jsou požadavky přísnější, používají se

superplastifikátory první nebo druhé generace. Hlavní funkcí všech plastifikátorů je adsorbování na povrch zrn cementu, kde změní povrchový náboj a tím pádem zabráňují shlukování jednotlivých zrn cementu do větších celků [3].

4 Trvanlivost vysokohodnotného betonu

Vzhledem k tomu, že náklady na běžnou konstrukci představují pouze 2 až 3 % z celkových nákladů na konstrukci během její životnosti, je třeba brát zřetel na trvanlivost použitého materiálu a v případě betonu to platí velmi výrazně [3].

Oproti běžnému betonu, který často mívá velmi porézní povrchovou strukturu a pro korozní činitele je relativně snadné se do něj dostat, má vysokohodnotný beton podstatně hutnější strukturu a tomuto volnému pronikání lépe odolává. Velmi důležitou roli však hraje, jak je s daným betonem nakládáno, ať se jedná o ukládání nebo ošetřování.

Ve většině případů jsou materiály do vysokohodnotného betonu pečlivě voleny a nestává se často, že by probíhala vnitřní koroze v důsledku špatné volby materiálu jako je alkalicko-křemičitá reakce pocházející z nevhodně zvoleného kameniva [3].

4.1 Struktura na mikroskopické úrovni

Oproti běžnému betonu má vysokohodnotný beton značně hutnější cementovou matici díky menšímu množství vody, a tedy zrna cementu jsou blíže k sobě a produkty hydratace nemusí překlenou tak velkou vzdálenost k sousednímu zrnu [3].

Struktura běžného betonu v okolí velkých zrn kameniva je podstatněji pórovitější než v jiném místě. Tento jev je způsoben odměšováním vody v důsledku vibrací velkých zrn, která zhutňují cementovou pastu, ale tato odmísená voda se zachytává na povrchu velkých zrn, a proto v důsledku nadbytku vody je matrice v jejich okolí pórovitější [3].

Tato vlastnost se u vysokohodnotného betonu neprojevuje, ale díky používání betonů s vysokými dávkami plastifikátoru, které jsou velmi tekuté, dochází k mírné segregaci cementového tmele na okrajích forem. V těchto místech prakticky nejsou přítomna větší zrna kameniva, jedná se pouze o cementový tmel s velkým zastoupením jemných částic příměsí [3].

4.2 Struktura na makroskopické úrovni

Dalším vlivem, který porušuje hutnost betonu, jsou trhliny. Každý beton během hydratace vykazuje smrštění. Může se jednat o smrštění v důsledku přílišného teplotního gradientu, odpařování povrchové vody anebo spotřebováváním vody. Smrštění nastává v důsledku nedostatku vody pro hydrataci a vzhledem k tomu, že vysokohodnotné betony mají nízký vodní součinitel, tak mají značně vyšší tendenci ke smršťování [3].

5 Smrštění betonu

Smrštění je jednoduchý fyzikální děj, při kterém se zmenšuje objem betonu během jeho hydratace. V betonu se však jedná o několik dějů, které mají synergický efekt a určují výsledné smrštění betonu. Vzhledem k tomu, že část těchto jevů již nastává v zatvrdlém betonu, vznikají v jeho objemu trhliny. Jednotlivé druhy smrštění se dají zařadit do několika skupin

5.1 Teplotní smrštění

Jako všechny materiály i beton podléhá teplotním objemovým změnám. Na rozdíl od jiných materiálů však beton během svého tuhnutí a tvrdnutí uvolňuje hydratační teplo, tedy po skončení těchto reakcí nastává chladnutí betonu a je možné pozorovat jeho smrštění, aniž by došlo ke změně okolního prostředí.

5.2 Plastické smrštění

Jedná o smrštění vlivem úniku vody z povrchu betonu, který se nachází v nezatvrdlém stavu a tento jev se dá velmi snadno ovlivnit běžným ošetřováním.

5.3 Smrštění odpařováním vody

Tento jev se projevuje v povrchových částech betonu díky snaze o vyrovnání vlhkosti mezi betonem a okolím. V tomto případě dochází k odpařování vody v již částečně zatvrdlém betonu. V malých kapilárních pórech betonu dochází k tahovému napětí, které je způsobeno tvorbou menisků vodní hladiny. Menisky vodní hladiny vytvářejí tahové napětí na stěny kapilár a zapříčiňují smrštění, pokud je přesažena pevnost betonu v tahu. Stejně jako v předchozím případě se dá tomuto smrštění zabránit aplikací běžného ošetřování [10].

5.4 Chemické smrštění

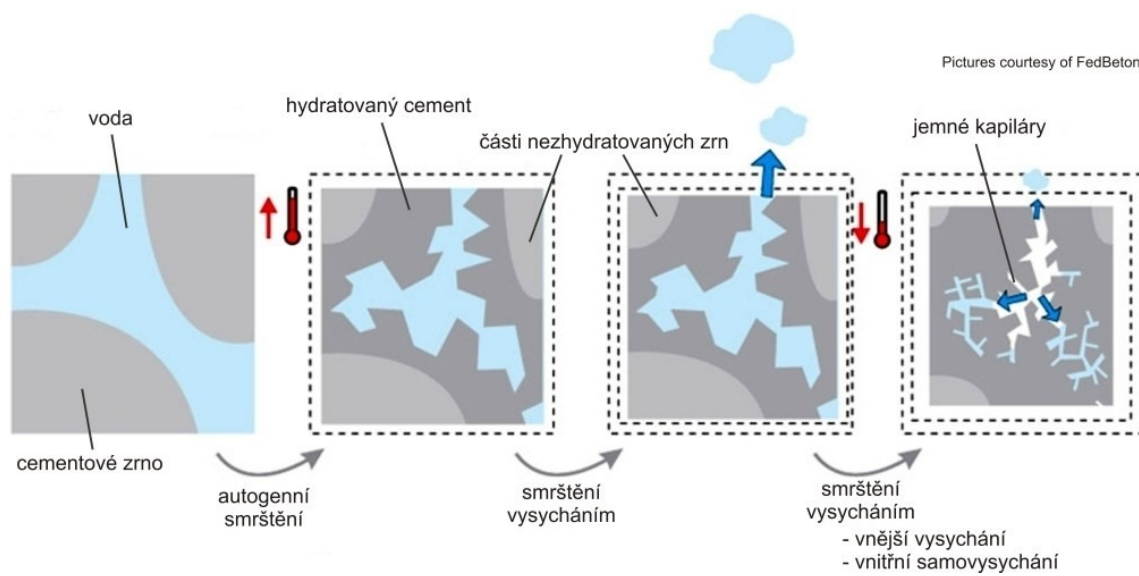
Výsledný objem produktu reakce cementu s vodou je menší než objem původního cementu a vody. Toto smrštění probíhá po celou dobu hydratace cementu, ale je nejvýraznější na začátku hydratace. Často nebývá na betonu vidět změna rozměru díky chemickému smrštění, protože ve volných místech po cementu vzniká ettringit a portlandit, které působí proti tomuto smrštění [3].

5.5 Autogenní smrštění

Princip autogenního smrštění je stejný jako smrštění vysycháním, jen s tím rozdílem, že voda se neodpařuje do okolního prostředí, ale je spotřebovávána reakcí, při které reaguje cement a voda. U běžných betonů s vysokým vodním součinitelem nedochází k tak výraznému poklesu vody a nutnosti ji využít i z malých pórů, a tedy toto smrštění není významné [11].

5.6 Smrštění vysokohodnotných betonů

Na rozdíl od běžných betonů, kde smrštění je hlavně způsobeno odpařováním, protože systém pórů je rozvinutý, se smrštění u vysokohodnotných betonů řídí převážně autogenním smrštěním znázorněném na obrázku 2. Tento jev je zapříčiněn tím, že obsah vody je nízký a její velké množství se spotřebuje na hydrataci. Samovysychání má výraznou roli, protože matrice je podstatně hutnější než u běžných betonů a nemůže tak snadno docházet k odpařování vody.



Obrázek 2: Schématické znázornění smršťování betonu [11].

6 Ošetřování betonu

Ošetřování betonu se dá rozdělit do dvou skupin, a to ošetřování pomocí vody nebo ošetřování pomocí aplikace povrchové vrstvy, která zabraňuje odpařování vody. Zjednodušeně se dá říci, že a pro betony s vyšším vodním součinitelem je lepší použití ochranného nástriku. Oba způsoby se provádějí minimálně po dobu, kterou popisuje norma ČSN EN 206-1. Výsledná minimální doba závisí na složení betonu, tedy na množství a druhu použitého cementu, vodním součiniteli, a také závisí na okolních podmínkách, ve kterých se beton vyskytuje. Doba ošetřování se prodlužuje, pokud se předpokládá rychlé odpařování vody z betonu [2].

6.1 Ošetřování pomocí vody

Běžně se provádí pomocí:

- mlžení,
- ponoření do vody,
- skrápění vodou,
- opatření betonu vlhkými rohožemi.

6.2 Aplikace povrchové vrstvy

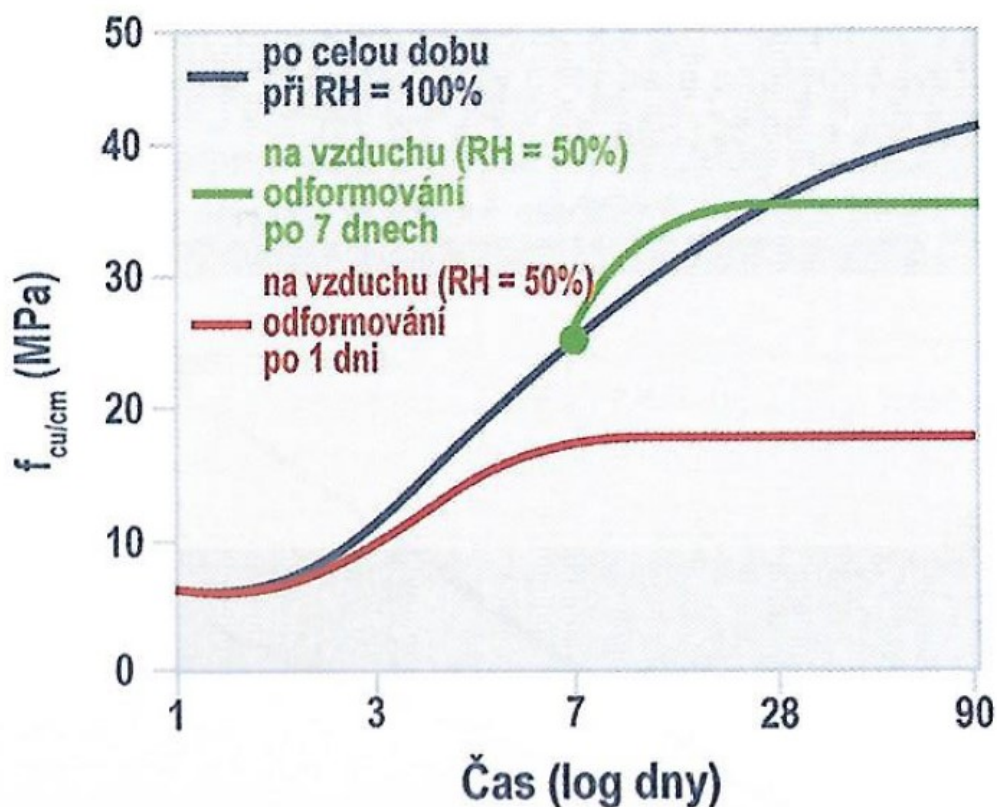
Druhým možným způsobem ošetřování je aplikace nepropustné membrány. Je možné užít nepropustnou folii na bázi plastu anebo častěji se používají nástriky z voděnepropustných látek, jako jsou například parafíny, které jsou rozpuštěny ve vysoce těkavých rozpouštědlech organického původu [2].

Ošetřování postřikem bývá levnější a snadnější varianta než ošetřování vodou, ale je potřeba zachovat patřičnou pracovní kázeň během aplikace [2].

6.3 Vliv ošetřování na pevnost

Pevnost betonu se charakterizuje jako pevnost po 28. dnech. Jak je znázorněno na obrázku 3, stejných pevností dosáhly vzorky ošetřované po dobu 7 dnů a 28 dnů, a tedy

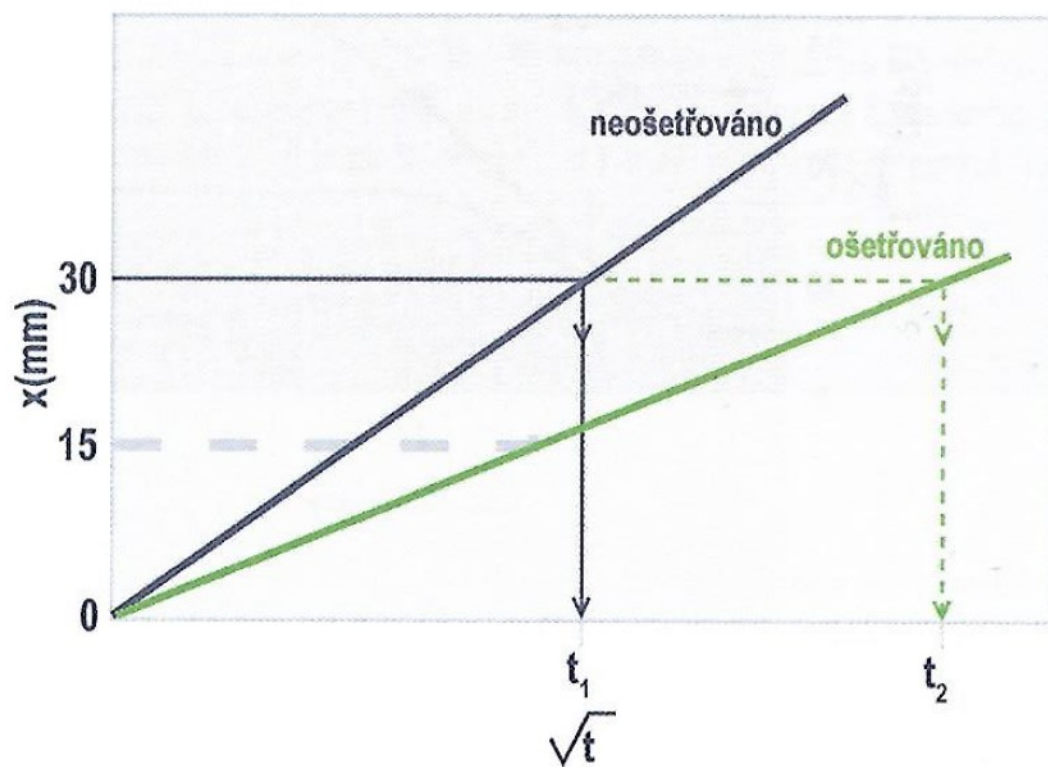
je při návrhu betonu nutné se také věnovat jeho způsobu ošetřování. Vzorek ošetřovaný po 28 dnů má stále tendenci zvyšovat svou pevnost po delší dobu než vzorky s kratší dobou ošetřování. Naproti tomu téměř neošetřovaný beton dosáhl asi jen 50 % pevnosti po 28 dnech, což je z hlediska ekonomického velmi neuspokojivé [2].



Obrázek 3: Vliv ošetřování na pevnost betonu [2]

6.4 Vliv ošetřování na trvanlivost

Snad ještě podstatnější vliv má ošetřování v případě trvanlivosti betonu. Zejména to platí o propustnosti krycí vrstvy, která není schopna dostatečně zamezit vstupu agresivních látek, jež mají za následek snížení pH a následnou korozi výztuže. Jak je patrné z obrázku 4, je rychlost zkarbonatování 30 mm krycí vrstvy podstatně vyšší u neošetřovaného betonu, než je tomu v případě betonu, který byl po delší dobu řádně ošetřován [2].



Obrázek 4: Vliv ošetřování na trvanlivost [2]

7 Vnitřní ošetřování betonu

Dalším možným způsobem ošetřování betonu je takzvané vnitřní ošetřování. Jedná se o proces, při kterém je do betonu přidána složka obsahující vodu. Jedná se o kamenivo nebo jiný pórovitý materiál, který je předem nasáklý vodou anebo lze například použít polymery obsahující vodu. Tato voda se nespotebovává hned ze začátku, kdy je v cementové kaši vody dost pro hydrataci, ale až v pozdější době hydratace. Poté, co dochází voda potřebná k hydrataci cementu, pak se začínají tvořit menisky hladiny vody v kapilárních pórech. Menisky způsobují tahové napětí v pórech, a tedy mohou vznikat smršťovací trhliny po překročení tahové pevnosti betonu. Když je vody nedostatek tak se vlivem osmózy začne uvolňovat z pórovitého kameniva a zabrání vzniku menisků.

Tento způsob ošetřování je velmi výhodné použít pro betony s pomalou hydratací, jako jsou betony s velkým množstvím popílku nebo například strusky, kde rychle reaguje část cementu a další reakce probíhají pomaleji, a tedy přítomnost velkého množství záměsové vody není vhodná.

Vnitřní ošetřování se ukazuje jako vhodné řešení pro vysokohodnotné betony, které jak bylo zmíněno, mají velmi hutnou strukturu. Běžné způsoby ošetřování velmi dobře fungují na jeho povrchovou vrstvu, ale po hydrataci je povrch špatně propustný pro ošetřovací vodu, která by se potřebovala dostat do vnitřní části betonu. Uvnitř vysokohodnotného betonu s pouze povrchovým ošetřováním dochází k nedostatku vody, a tedy tvorbě menisků, které mají za následek autogenní smršťování betonu. Tento problém může být vyřešen vnitřním ošetřováním, které potřebnou vodu během pozdější hydratace poskytne [6].

Problémem vnitřního ošetřování je volba vhodného druhu porézního materiálu, který je zároveň schopen nasáknout a udržet vodu pro pozdější ošetřování a zároveň by neměl mít výrazný vliv na snížení pevnosti výsledného betonu, protože se tímto materiálem často nahrazuje část kameniva, které je významným nositelem pevnosti betonu.

Experimentální část

8 Použité zkoušení a metodika výroby těles

Experimentální část diplomové práce je zaměřena na smršťování betonu v případě, že do betonové směsi byl přidán pórovitý recyklát a zkoušení, zdali tento přídavek měl za následek změny smršťování. Po ukončení měření smrštění po 28. dnech byla tělesa podrobena zkoušce pevnosti v tahu ohybem a pevnosti v tlaku dle normy ČSN EN 196-1 (Stanovení pevnosti cementu). Pro nastínění problému, že betony s nízkým vodním součinitelem mají větší tendenci se smršťovat, byly namíchány také záměsi z běžného betonu o různých vodních součinitelích. Pro kontrolu smrštění vysokohodnotných betonů byly namíchány záměsi, kde bylo nahrazeno různé množství kameniva betonovým recyklátem. Používal se vysušený betonový recyklát, který byl přidán do míchačky spolu s větším množstvím záměsové vody a také betonový recyklát nasáklý záměsovou vodou po dobu 24 hodin. K těmto záměsím byla vyrobena referenční záměs bez přidání betonového recyklátu. Betonový recyklát byl podroben zkouškám nasákavosti, objemové hmotnosti a byl proveden síťový rozbor pro určení křivky zrnitosti. Pro kontrolu, zdali k menšímu smrštění nedochází v důsledku vnitřního ošetřování pomocí nasáklého recyklátu, ale v důsledku přídavku vody, byly také namíchány záměsi se stejným množstvím vody jako v případě těles s recyklátem, kde však byl ponechán pouze písek a recyklát nebyl přidán.

8.1 Metodika přípravy těles

Sypké složky receptur byly váženy na váze s přesností 1 g a pro navážení tekutých složek byla použita váha s přesností na 0,2 g. Míchání probíhalo tak, že se do navlhčené míchačky, nejprve umístilo ve stejném pořadí kamenivo, příměsi (vápenec, metakaolín a betonový recyklát) a cement, poté byly tyto složky po dobu 30 sekund zamíchány a pak byla přidána voda a míchání probíhalo dalších 30 sekund. Následně dle programu míchačky probíhalo 10 sekundové zastavení, při kterém se pomocí stěrky odstranily ulpělé složky z okrajů nádoby a stíracích lopatek a následovalo další míchání po dobu jedné minuty. Po prvním dokončeném programu byl spuštěn stejný míchací program ještě jednou, při kterém byl na začátku přidán plastifikátor.

Po zamíchání byla tělesa umístěna do ocelových forem, na které byl nanesen odbedňovací olej v minimálním potřebném množství. Na formy bylo umístěno sklo a tyto formy byly ponechány po dobu 24 hodin v klimatizační komoře. Po vyjmutí byla jedna sada těles z běžného betonu umístěna do kádě s ošetřovací vodou a druhá byla zabalena do smršťovací folie. Pro kontrolu, zdali nedochází k úniku vody, byla tělesa zvážena před zabalením a následně opět zvážena po vybalení po skončení měření. U těles z vysokohodnotného betonu probíhalo měření pouze na vzorcích zabalených do smršťovací folie, které byly také zváženy na začátku a po skončení měření.

8.2 Volba přípravy recyklátu

Původně měl být použit recyklát, který by byl vnitřně nasáklý, ale povrchově suchý. Takto připravený recyklát by charakterizovala nasákavost určená dle normy na měření objemové hmotnosti kameniva pyknometrickou zkouškou. Tento postup však nebylo možné pro použitý betonový recyklát využít, protože při opakování této zkoušky vycházely velmi rozdílné výsledky a extrémně záleželo na síle zhutnění. Proto byla zvolena metoda, při které byla dodávána voda do záměsi s betonovým recyklátem tak, aby vznikaly záměsi o stejné konzistenci. Poté byla také připravena záměs s předem nasáklým recyklátem.

8.3 Konzistence čerstvé malty

U vysokohodnotných betonů byla snaha o namíchání všech záměsů se stejnou konzistencí. Pro tuto kontrolu byl použit postup dle normy ČSN EN 1015-3 (Zkouška konzistence čerstvé malty s použitím střešacího stolku).

8.4 Měření smrštění těles

Smrštění vzorků běžného betonu probíhalo na hranolech o rozměrech 65x50x250 mm s použitím příložného dilatometru typu Hollan. Po vyjmutí z klimatizační skříně byly přilepeny pomocí dvousložkového epoxidového lepidla měřící terčíky, ve vzdálenosti, mezi nimiž byla vzdálenost 200 mm. Měření probíhalo od druhého dne, protože nultý den byla tělesa namíchána, první den byla odbedněna a byly nalepeny terčíky, u kterých muselo vytvrdnout lepidlo po dobu 24 hodin. Poté měření probíhalo od druhého dne,

kdy byla zaznamenána nulová hodnota. Dále byly pak vždy měřeny tělesa v 3., 4., 7., 11., 18., 25. dni a v 28. dni byla měření smrštění ukončena.

U vysokohodnotných betonů byla metodika pozměněna a zkouška objemových změn probíhala na trámečcích o šířce 40 mm, výšce 40 mm a délce 160 mm. Ve speciálních ocelových formách byly na koncích otvory, kde se pomocí plastelíny dočasně ukotvil ocelový čep, který částečně zasahoval do prostoru, který byl zalit betonem a zde se zabetonoval. Díky této změně mohlo měření probíhat již hned po odbednění, a tedy oproti předchozímu bylo možné zaznamenat původní hodnotu délky již první den.

8.5 Měření pevnosti

Na všech vzorcích byla měřena pevnost v tahu za ohybu na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm na zkušebním lise dle normy ČSN EN 196-1 (Stanovení pevnosti cementu). Poloviny rozlomených trámečků byly podrobeny zkoušce pevnosti v tlaku také prováděné na stejném lise. Zkouška vždy probíhala na třech tělesech, tedy proběhly 3 měření pevnosti v tahu za ohybu a 6 zkoušek pevností v tlaku jednotlivých záměsí.

9 Suroviny pro výrobu betonu

9.1 Kamenivo

Pro beton bylo používáno drobné kamenivo ze štěrkovny Polešovice. Jedná se o přírodní těžené kamenivo frakce 0/4 vhodné do betonu a malt. Před použitím bylo toto kamenivo vysušeno do nulové vlhkosti v sušárně při teplotě 105 ± 5 °C. (Písek Polešovice)

9.2 Cement

Pro výrobu betonu byl použit cement z cementárny Cement Hranice. Konkrétně se jednalo o portlandský cement CEM I 42,5 R s rychlým náběhem pevnosti.

9.3 Voda

Voda byla použita z vodovodního řádu města Ostravy, která vyhovuje jako voda vhodná pro použití do betonu.

9.4 Přísady

Při výrobě betonu byl použit plastifikátor společnosti BASF MasterGlenium ACE 300 na bázi polykarboxylátetherů. Jeho objemová hmotnost se pohybuje mezi 1,044 až 1,084 g/cm³. Doporučené dávkování je 0,6 až 1,1 % hmotnosti cementu. Obsah chloridu se menší než 0,1 % [13].

9.5 Příměsi

První použitou příměsí byl metakaolín Metaver I společnosti NEWCHEM, který reaguje s portlanditem za tvorby dodatečných CSH fází [14].

Druhou použitou příměsí byl jemně mletý vápenec s majoritním zastoupením CaCO₃.

9.6 Betonový recyklát

Jako betonový recyklát byl využit tříděný betonový recyklát společnosti DESTRO frakce 0/4, který je zobrazen na obrázku 5. Jedná o volně nedostupný materiál, a proto na něm byly provedeny zkoušky kameniva dle normy ČSN EN 12620+A1 (Kamenivo do betonu). Jednalo se o zkoušku zrnitosti, objemové hmotnosti, nasákavosti a mezerovitosti. Betonový recyklát byl před použitím vysušen v sušárně při teplotě 105 ± 5 °C. Zkoušky objemové hmotnosti a nasákavosti byly dělány pomocí pyknometrické metody, ale tyto výsledky jsou pouze orientační z toho důvodu, že nelze, jak bylo již dříve řečeno, určit, kdy je betonový recyklát nasáklý, ale povrchově osušený.



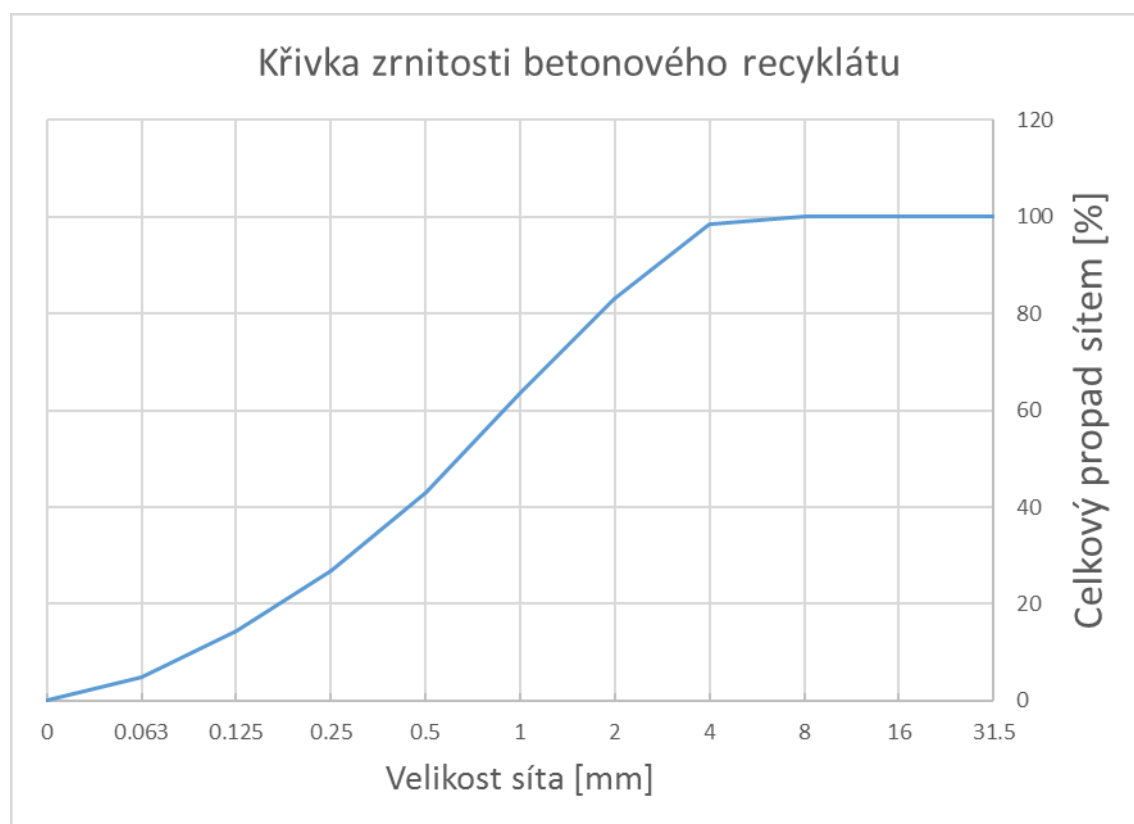
Obrázek 5: Betonový recyklát DESTRO

9.6.1 Zkouška zrnitosti

Na betonovém recyklátu byl proveden síťový rozbor dle normy ČSN EN 933-1 (Stanovení zrnitosti – síťový rozbor). Výsledky jsou zaznamenány v tabulce 1 a křivka zrnitosti je znázorněna na grafu 1.

Tabulka 1: Sítový rozbor betonového recyklátu

Velikost síta [mm]	Zbytek na síti [g]	Dílčí zbytek na síti [%]	Celkový zbytek na síti [%]	Celkový propad sítem [%]
31.5	0	0.0	0.0	100
16	0	0.0	0.0	100
8	0	0.0	0.0	100
4	15.4	1.5	1.5	98.5
2	154.6	15.5	17.0	83.0
1	191.2	19.1	36.1	63.9
0.5	209.2	20.9	57.1	42.9
0.25	159.4	15.9	73.0	27.0
0.125	126.6	12.7	85.7	14.3
0.063	94.2	9.4	95.1	4.9
0	48.8	4.9	100	0.0
Suma	999.4	100		



Graf 1: Křivka zrnitosti betonového recyklátu

9.6.2 Zkouška objemové hmotnosti a nasákavosti

Objemová hmotnost byla vypočítána dle vzorce (1), nasákavost dle vzorce (2), výsledky jsou zaznamenány v tabulce 2.

$$\rho_{ps} = \frac{m_a}{m_a - (m_b - m_c)} \cdot \rho_w \quad (1)$$

$$N = \frac{m_a - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad (2)$$

kde:

m_a – hmotnost nasáklého kameniva [kg]

m_b – hmotnost vzorku s vodou v pyknometru [kg]

m_c – hmotnost pyknometru s vodou [kg]

m_d – hmotnost vysušeného kameniva [kg]

ρ_w – hustota vody [kg/m³]

N – nasákavost [%]

ρ_{ps} – objemová hmotnost vysušeného kameniva [kg/m³]

Tabulka 2: Objemová hmotnost a nasákavost betonového recyklátu

P_w při 20°C [kg/m ³]	998.205
m_a [kg]	1.202
m_b [kg]	10.638
m_c [kg]	10.0325
m_d [kg]	0.992
P_{ps} [kg/m ³]	2011
N [%]	0.212

9.6.3 Zkouška sypných hmotností a mezerovitosti

Zkouška volně sypané objemové hmotnosti (ρ_{vs}) byla provedena v kalibrované nádobě o daném objemu (V) a je vyjádřena vzorcem (3). Z vypočítané sypné hmotnosti a

objemové hmotnosti pyknometrickou metodou (ρ_{ps}) byla určena mezerovitost kameniva (M) dle vzorce (4). Výsledky jsou znázorněny v tabulce 3.

$$\rho_{vs} = \frac{m_{vs}}{V} \quad (3)$$

$$M = 1 - \frac{\rho_{vs}}{\rho_{ps}} \cdot 100 \quad (4)$$

Tabulka 3: Sypná hmotnost a mezerovitost betonového recyklátu

m [kg]	1.4599
V [m ³]	0.00099
ρ_{ps} [kg/m ³]	2011
ρ_{vs} [kg/m³]	1472
M [%]	26.8

10 Receptury betonových záměsí

V první etapě byly namíchány tři receptury z běžného betonu s různým vodním součinitelem. Pro nastínění toho, že betony s vyšším vodním součinitelem mají vyšší tendenci ke smršťování vysycháním, ale menší k autogennímu smrštění. Receptury jsou znázorněny v tabulce 4 a byly navrženy tak, aby všechny měly stejnou konzistenci a poměr cementu a písku byl 1:3.

Tabulka 4: Receptura běžného betonu

Navážka na 1 m ³	Označení záměsí		
	w = 0,3	w = 0,4	w = 0,5
Písek Polešovice 0–4 [kg]	1350	1350	1350
Cement CEM I 42,5 R [kg]	450	450	450
Voda [kg]	135	180	225
Plastifikátor Glenium 300 [kg]	12.5	3.5	0

V druhé etapě bylo namícháno celkem deset záměsí z vysokohodnotného betonu. Jednalo se o jednu referenční záměs a tři receptury s různou náhradou písku betonovým recyklátem. Poté byly připraveny další tři receptury se stejnými obsahy recyklátu jako v předchozím případě, ale byla přidána voda, tak aby vznikla stejná konzistence jako u referenční záměsí. Pro kontrolu, zdali nedošlo ke snížení smrštění pouze přítomností přidané vody, byly namíchány odpovídající záměsí s přídatkem vody, u kterých však písek nebyl nahrazen recyklátem. Složení namíchaného betonu je uvedeno v tabulce 3.

Tabulka 5: Receptura vysokohodnotných betonů

Navážka na 1 m ³	Označení záměsí			
	Referenční	5 % Recyklát	5 % Recyklát + voda	10 % Recyklát
Písek Polešovice 0–4 [kg]	960	912	912	864
Cement CEM I 42,5 R [kg]	650	650	650	650
Metakaolín [kg]	75	75	75	75
Vápenec [kg]	60	60	60	60
Betonový recyklát 0–4 [kg]	0	48	48	96
Voda [kg]	165	165	170	165
Plastifikátor Glenium 300 [kg]	8	8	8	8
Navážka na 1 m ³	Označení záměsí			
	10 % Recyklát + voda	15 % Recyklát	15 % Recyklát + voda	Písek + voda z 5 %
Písek Polešovice 0–4 [kg]	864	816	816	960
Cement CEM I 42,5 R [kg]	650	650	650	650
Metakaolín [kg]	75	75	75	75
Vápenec [kg]	60	60	60	60
Betonový recyklát 0–4 [kg]	96	144	144	0
Voda [kg]	175	165	180	170
Plastifikátor Glenium 300 [kg]	8	8	8	8
Navážka na 1 m ³	Označení záměsí			
	Písek + voda z 10 %	Písek + voda z 15 %		
Písek Polešovice 0–4 [kg]	960	960		
Cement CEM I 42,5 R [kg]	650	650		
Metakaolín [kg]	75	75		
Vápenec [kg]	60	60		
Betonový recyklát 0–4 [kg]	0	0		
Voda [kg]	175	180		
Plastifikátor Glenium 300 [kg]	8	8		

V poslední etapě byly připraveny tři záměsí. Jednalo se opět o jednu referenční záměs z důvodu, aby bylo možné porovnávat záměsí míchané z neidentických surovin. Dále pak byly namíchány receptury s 10 % a 15 % náhradou písku betonovým recyklátem, který byl však po dobu 24 hodin umístěn v záměsové vodě, aby předem nasákl. Pak bylo přidáno jen tolik vody, aby byla konzistence malty stejná jako v případě referenční směsi. Tyto receptury s předem nasáklým betonovým recyklátem jsou znázorněny v tabulce 4.

Tabulka 6: Receptura vysokohodnotného betonu s předem nasáklým recyklátem

Navážka na 1 m ³	Označení záměsí		
	Referenční	10 % Nasáklý recyklát + voda	15 % Nasáklý recyklát + voda
Písek Polešovice 0–4 [kg]	960	864	816
Cement CEM I 42,5 R [kg]	650	650	650
Metakaolín [kg]	75	75	75
Vápenec [kg]	60	60	60
Betonový recyklát 0–4 [kg]	0	96	144
Voda [kg]	165	175	180
Plastifikátor Glenium 300 [kg]	8	8	8

11 Smrštění běžného betonu

Pro to, aby bylo ukázáno, jaký je průběh měřeného smrštění pro betony s různým vodním součinitelem, bylo vyrobeny tři záměsi s vodními součiniteli 0,5, 0,4 a 0,3. Smrštění bylo testováno na hranolech 65x50x250 mm s použitím příložného dilatometru typu Hollan, který je na obrázku 6. Z každé záměsi bylo vyrobeno šest těles, z toho byly tři uloženy v kádi s ošetřovací vodou a další tři byly zabaleny do smršťovací folie. Měření probíhalo od druhého dne po míchání a poté 3., 4., 7., 11., 18., 25. a v 28. den. Pro lepení terčíků bylo použito dvousložkové epoxidové lepidlo. Výsledky měření jsou zobrazeny v tabulce 7. Úplné výsledky smrštění jednotlivých těles je možné nalézt v příloze 1. V tabulce je zaznamenáno poměrné smrštění těles, které bylo získáno jako průměrná hodnota smrštění měřená na třech tělesech. V případě receptury s vodním součinitelem 0,4 a receptury s vodním součinitelem 0,5, které byly uloženy ve smršťovací folii, je hodnota v tabulce pouze průměr ze dvou měření. V těchto případech nebylo možné na jednom tělese měřit smrštění, protože došlo k posunutí terčíků pravděpodobně během manipulace a byla překročena měřitelná stupnice přístroje.



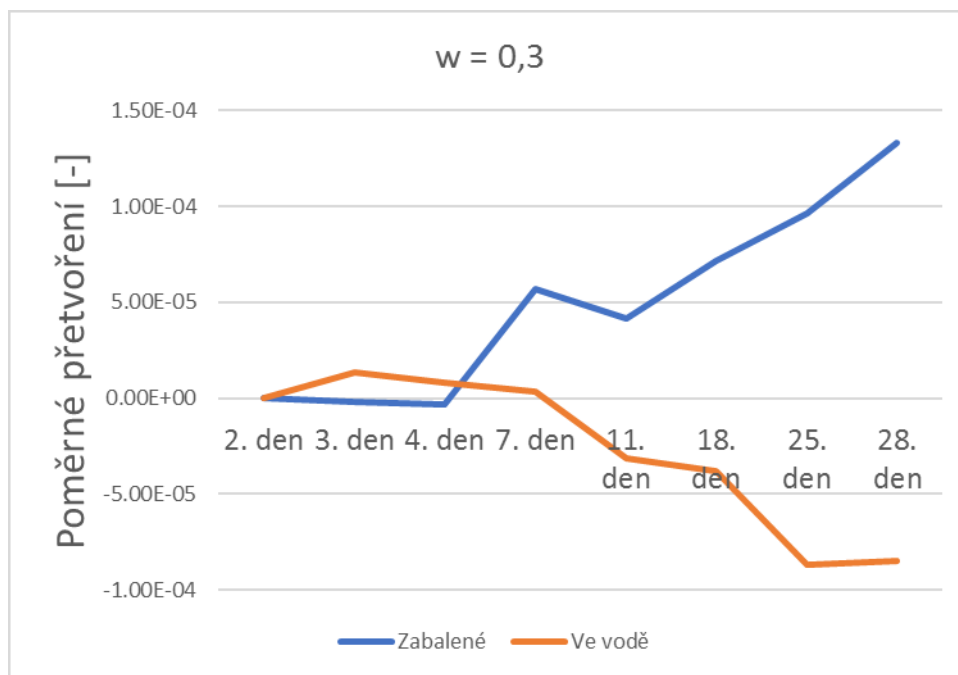
Obrázek 6: Příložný dilatometr

Tabulka 7: Poměrné smrštění běžného betonu

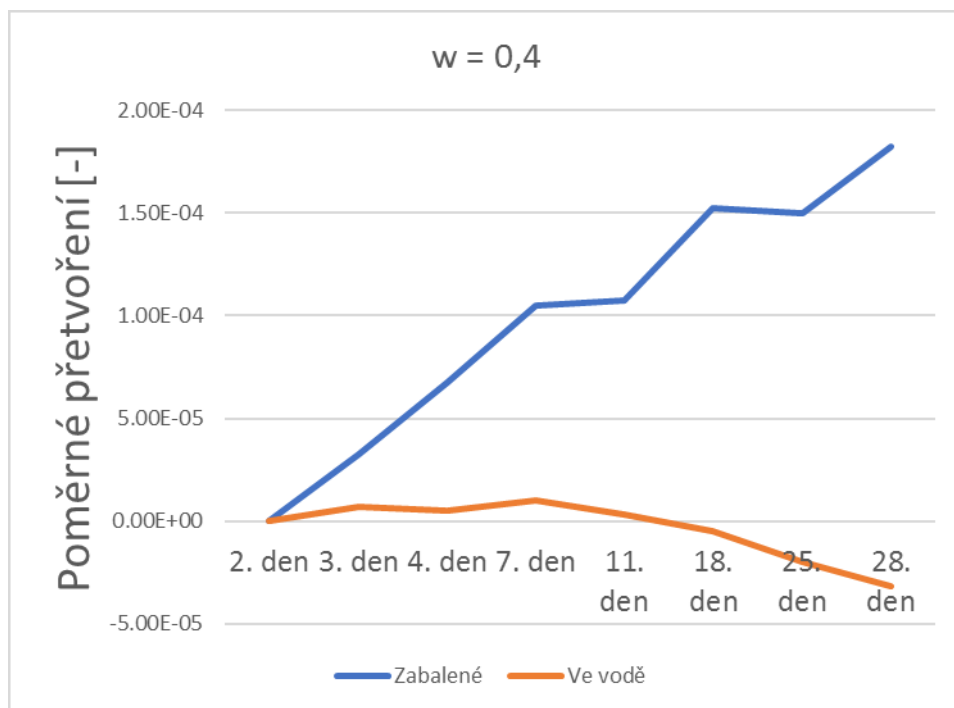
Označení záměsí	w = 0,3		w = 0,4		w = 0,5	
	Zabalené	Ve vodě	Zabalené	Ve vodě	Zabalené	Ve vodě
Poměrné smrštění 2 den [-]	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Poměrné smrštění 3 den [-]	-1.67E-06	1.33E-05	3.25E-05	6.66E-06	-4.99E-06	-4.83E-05
Poměrné smrštění 4 den [-]	-3.33E-06	8.33E-06	6.74E-05	5.00E-06	9.99E-06	-4.83E-05
Poměrné smrštění 7 den [-]	5.66E-05	3.33E-06	1.05E-04	9.99E-06	5.24E-05	-4.16E-05
Poměrné smrštění 11 den [-]	4.16E-05	-3.16E-05	1.07E-04	3.33E-06	6.74E-05	-3.83E-05
Poměrné smrštění 18 den [-]	7.16E-05	-3.83E-05	1.52E-04	-5.00E-06	6.49E-05	-3.66E-05
Poměrné smrštění 25 den [-]	9.66E-05	-8.66E-05	1.50E-04	-2.00E-05	3.99E-05	-4.33E-05
Poměrné smrštění 28 den [-]	1.33E-04	-8.49E-05	1.82E-04	-3.16E-05	1.50E-05	-7.65E-05

11.1 Vliv ošetřování na poměrnou deformaci

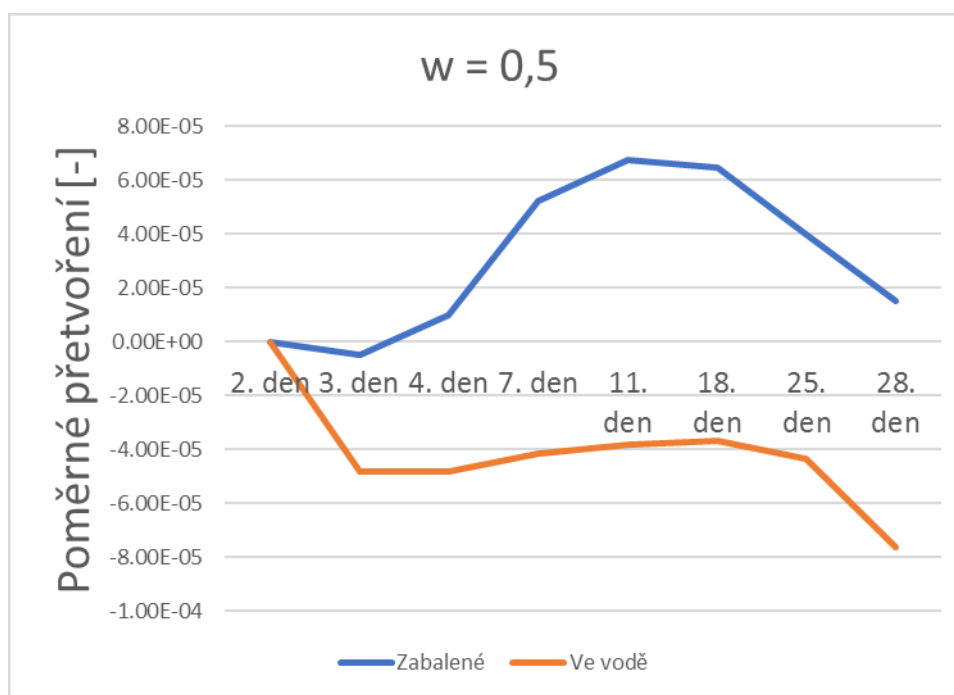
Pro lepší názornost výsledků jsou na grafech 2, 3 a 4 vykresleny hodnoty poměrného přetvoření po dobu měření. Jedná se vždy o průběh přetvoření těles umístěných ve vodě a těles zabalených do folie pro jednotlivé receptury.



Graf 2: Přetvoření receptury $w=0,3$



Graf 3: Přetvoření receptury $w=0,4$



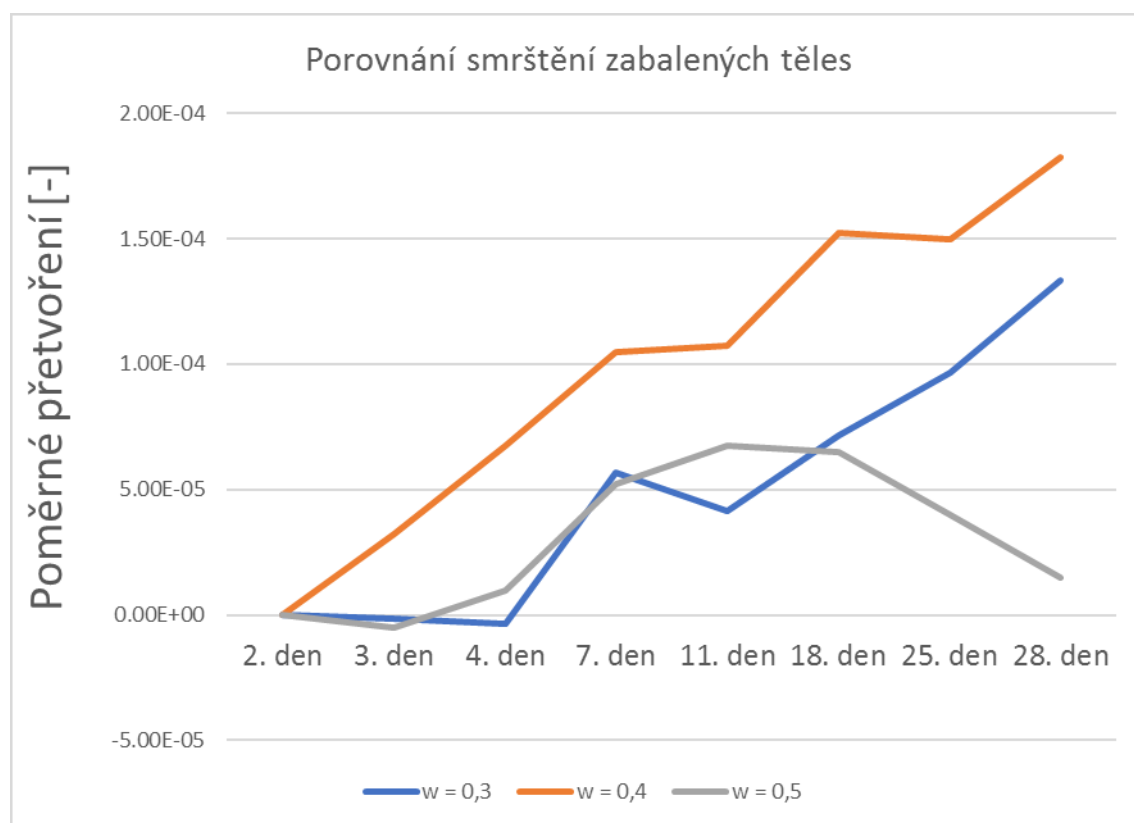
Graf 4: Přetvoření receptury $w=0,5$

Jak je možné vidět z průběhů jednotlivých grafů, beton ošetřovaný ve vodní lázni vykazoval smrštění pouze na začátku měření a následně docházelo ke zvyšování objemu. Tento jev je nejvíce patrný u receptury s vodním součinitelem 0,3. Z těchto

výsledku se dá vypořádat, že takto vyrobený beton má strukturu schopnou přijmout vodu z okolí a díky ní dochází k bobtnání.

11.2 Vliv vodního součinitele na poměrnou deformaci

V případě těles zabalených do folie je patrné, že s klesajícím vodním součinitelem roste tendence ke smršťování. Beton s vodním součinitelem 0,5 přibližně od poloviny měření začala zvyšovat svůj objem. Nejvyšší smrštění bylo naměřeno u záměsi s vodním součinitelem 0,4, ale vzhledem k tomu, že smrštění je velice malé a měřicí metoda citlivá, může se jednat o chybu měření. Porovnání celkových smrštění zabalených těles je znázorněno na grafu 5.



Graf 5: Porovnání smrštění zabalených těles

12 Pevnost běžného betonu

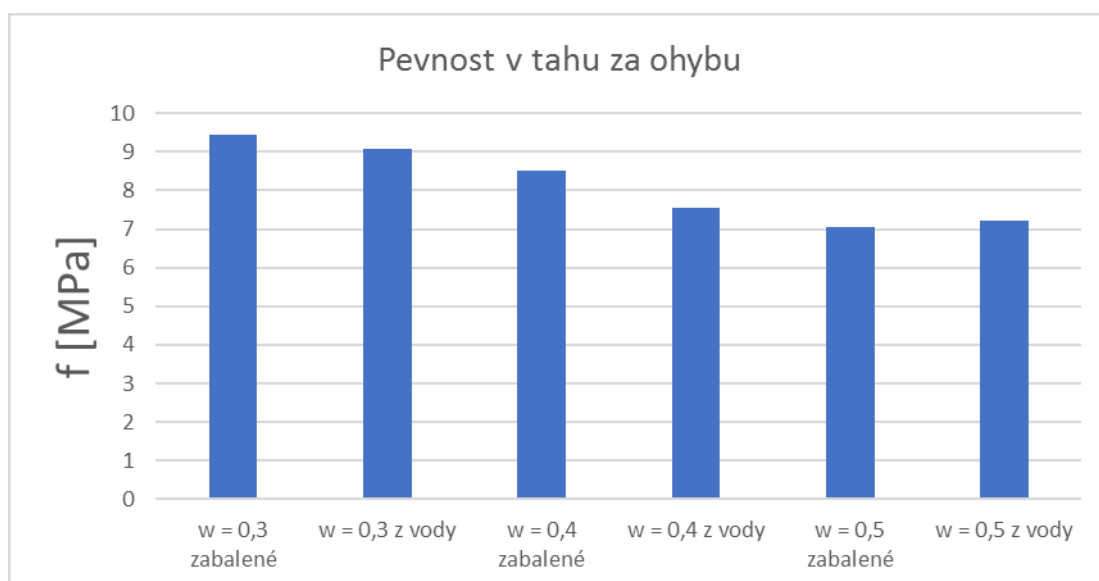
Pevnost běžného betonu byla zkoušena na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm vždy na třech tělesech pro každou záměs a způsob ošetřování. Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku jsou znázorněny v tabulce 8 a výsledky pevností jednotlivých těles lze najít v příloze 2. Dále pro úplnost byla měřena také objemová hmotnost jednotlivých vzorků a její průměrná hodnota je rovněž uvedeny tabulce 8.

Tabulka 8: Průměrné hodnoty pevností a objemové hmotnosti běžného betonu

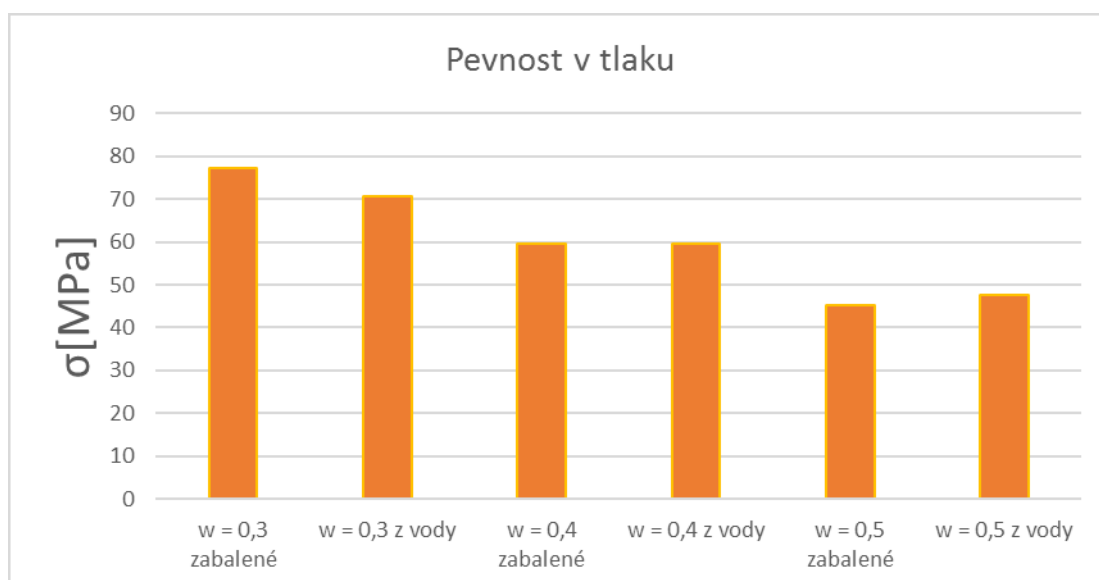
	[MPa]		[kg/m ³]
	Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku	Objemová hmotnost
w = 0,3 zabalené	9.5	77.1	2315
w = 0,3 z vody	9.1	70.7	2282
w = 0,4 zabalené	8.5	59.5	2184
w = 0,4 z vody	7.5	59.7	2193
w = 0,5 zabalené	7.1	45.2	2135
w = 0,5 z vody	7.2	47.5	2193

12.1 Vliv ošetřování na pevnost betonu

Jak je možné vidět na grafech 6 a 7, jsou výsledné pevnosti ošetřovaných a neošetřovaných těles velmi podobné, a to pravděpodobně z toho důvodu, že v těchto recepturách je přítomen dostatek vody, a proto nevznikají výrazné trhliny, které by měly za následek snížení pevnosti. Navíc smršťovací trhliny u běžného betonu jsou způsobeny převážně odpařováním vody, ale tomu bylo v obou případech zabráněno.



Graf 6: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu běžného betonu



Graf 7: Pevnosti v tlaku běžného betonu

13 Konzistence a kontrola hmotnosti vysokohodnotného betonu

Vzhledem k tomu, že nebylo možné určit, kdy je betonový recyklát vnitřně nasáklý, ale povrchové osušený, byla měřena konzistence na střešacím stolku, aby bylo možné jednotlivé záměsi porovnat. Záměsi s označením 5 % Recyklát + voda, 10 % Recyklát + voda a 15 % Recyklát + voda byly odladňovány tak dlouho, dokud konzistence nebyla podobná jako u referenční záměsi. Po odladění byly namíchány také záměsi s recyklátem, který byl ponechán po dobu 24 hodin v záměsové vodě. Hodnoty konzistence jednotlivých receptur jsou v tabulce 9.

Tabulka 9: Rozlití receptur vysokohodnotného betonu

	Rozlití [mm]		Průměr [mm]
Referenční	250	250	250
5 % Recyklát	220	210	215
5 % Recyklát + voda	250	240	245
10 % Recyklát	160	170	165
10 % Recyklát + voda	250	250	250
15 % Recyklát	120	130	125
15 % recyklát + voda	230	250	240
Písek + voda z 5 %	260	260	260
Písek + voda z 10 %	280	290	285
Písek + voda z 15 %	Neměřitelné ≥ 300	Neměřitelné ≥ 300	Neměřitelné ≥ 300
Referenční k nasáklému	250	250	250
10 % Recyklát + voda nasáklý	170	170	170
15 % Recyklát + voda nasáklý	180	190	185

Rozlití referenčních záměsí a záměsí s označením 5 % Recyklát + voda, 10 % Recyklát + voda a 15 % Recyklát + voda bylo 250 mm, tedy recyklát během míchání byl schopen absorbovat asi jeden gram vody na deset gramů recyklátu. Při srovnání receptur se suchým a nasáklým recyklátem je viditelný pokles konzistence u betonů s nasáklým recyklátem, a tedy dlouhodobá nasákavost recyklátu je podstatně vyšší než 10 %. Je však pravděpodobné, že původně suchý recyklát ještě během prvních hodin hydratace absorboval vodu a jeho podíl na výsledném vnitřním ošetřování nemusí být výrazně horší, než je tomu u nasáklého recyklátu. Z pohledu na receptury s přidanou vodou k písku je patrné z konzistencí, že nasákavost recyklátu je výrazně vyšší než u písku.

Pro kontrolu, zdali nedochází k úniku vody ze zabalených těles ve smršťovací folii, byla tato tělesa zvážena před zabalením do folie a opět zvážena po rozbalení po 28 dnech. Výsledky měření hmotnosti jsou vyobrazeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Hmotnosti vzorků před zabalením a po vybalení

Označení vzorku	hmotnost před zabalením [g]			po vybalení po 28. dnech [g]		
	1	2	3	1	2	3
Referenční	611	621	629	610	620	627
5 % Recyklát	625	620	618	623	618	617
5 % Recyklát + voda	626	617	623	624	616	621
10 % Recyklát	608	611	607	607	610	605
10 % Recyklát + voda	607	619	611	606	618	610
15 % Recyklát	627	615	624	626	614	623
15 % recyklát + voda	627	610	629	625	609	628
Písek + voda z 5 %	608	616	603	606	614	601
Písek + voda z 10 %	622	610	617	620	609	616
Písek + voda z 15 %	601	609	603	600	608	601
Referenční k nasáklému	604	603	610	602	601	608
10 % Recyklát + voda nasáklý	622	617	620	620	615	618
15 % Recyklát + voda nasáklý	610	599	617	608	597	615

Z výsledků je patrné, že ze vzorků mohly uniknout až dva gramy vody, což ale není velmi významné, a navíc hmotnosti byly měřeny na váze, která má přesnost ± 2 g a tedy se může jednat o chybu vážení.

14 Smrštění vysokohodnotného betonu

Při měření vysokohodnotného betonu byla použita rozdílná metoda záznamu deformací. Zkouška probíhala na přístroji FORM+TEST Mituloyo zobrazeném na obrázku 7. V tomto přístroji se měří deformace trámečků na ocelových hrotech, které byly během betonování trámečku do něj zabetonovány. Díky tomu, že se měřicí základny (ocelové hroty) již umístily do forem během betonování je oproti předchozí hodnotě možné měřit deformace již od prvního dne od míchání. Další měření probíhalo ve stejné dny jako u běžných betonů, tedy v 2., 3., 4., 7., 11., 18., 25. a 28. dni. Měření tedy probíhalo na trámečcích o rozměrech 40x40x160 mm a bylo vždy změřeno na třech tělesech. Každé těleso bylo měřeno v obou směrech, tedy dvakrát. Měření touto metodou bylo velmi citlivé, protože přístroj byl schopen zaznamenat deformaci o velikosti jednoho micrometru a jakákoliv manipulace s přístrojem zapříčinila jeho rozladění, proto musel být po každém měření kalibrován dřevěným etalonem. V tabulce 11 jsou vypsány průměrné hodnoty poměrné deformace pro jednotlivé receptury a deformace jednotlivých těles je znázorněna v příloze 3. Během všech měření byla kontrolována teplota a vlhkost v laboratoři, ale ta se během měření měnila jen velmi málo a všechny hodnoty byly zaznamenány při teplotě $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vlhkosti $50\text{ \%} \pm 5\text{ \%}$.



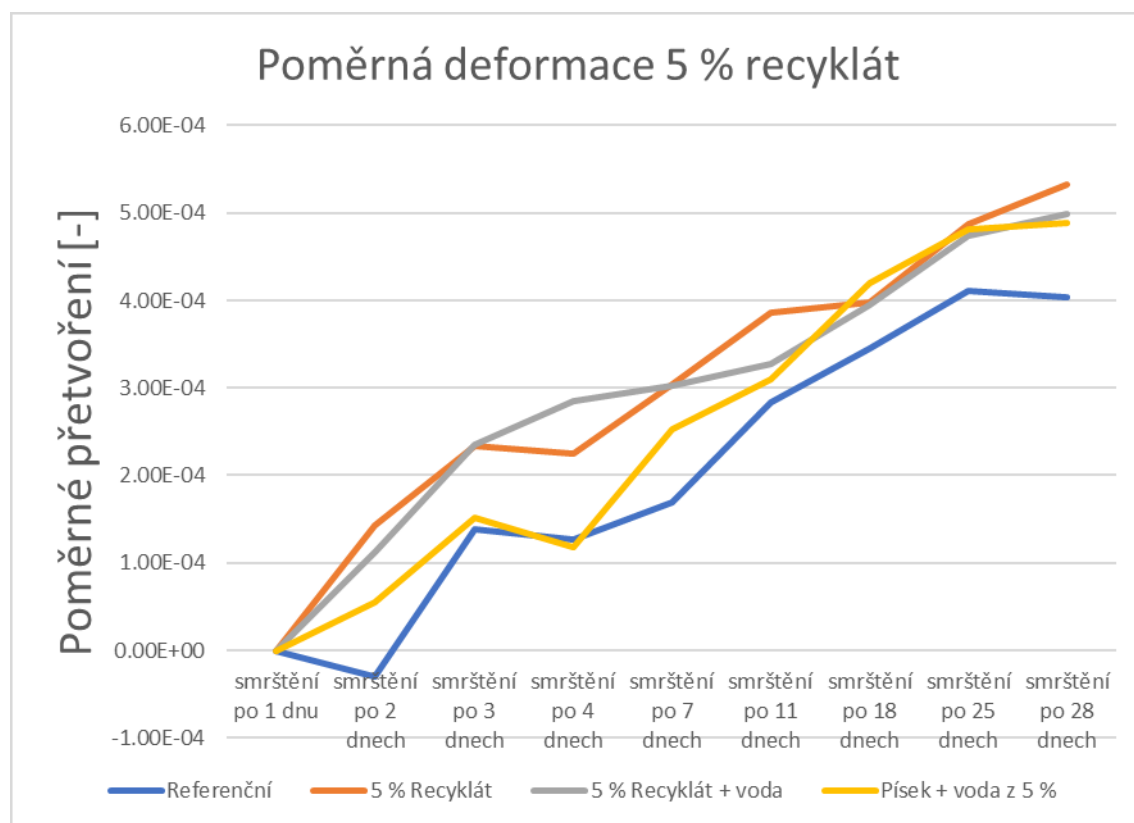
Obrázek 7: Přístroj na měření deformace FORM+TEST

Tabulka 11: Průměrné hodnoty poměrné deformace receptur z HPC

	Referenční	5 % Recyklát	5 % Recyklát + voda	10 % Recyklát	10 % Recyklát + voda
smrštění po 1 dnu	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
smrštění po 2 dnech	-2.99E-05	1.42E-04	1.12E-04	4.74E-05	3.35E-05
smrštění po 3 dnech	1.38E-04	2.34E-04	2.35E-04	1.66E-04	1.08E-04
smrštění po 4 dnech	1.27E-04	2.25E-04	2.84E-04	2.14E-04	1.69E-04
smrštění po 7 dnech	1.69E-04	3.04E-04	3.03E-04	2.30E-04	2.14E-04
smrštění po 11 dnech	2.83E-04	3.87E-04	3.28E-04	3.14E-04	2.94E-04
smrštění po 18 dnech	3.46E-04	3.98E-04	3.95E-04	3.63E-04	3.27E-04
smrštění po 25 dnech	4.12E-04	4.88E-04	4.74E-04	4.24E-04	3.63E-04
smrštění po 28 dnech	4.04E-04	5.32E-04	4.99E-04	4.21E-04	3.71E-04
-					
	15 % Recyklát	15 % recyklát + voda	Písek + voda z 5 %	Písek + voda z 10 %	Písek + voda z 15 %
smrštění po 1 dnu	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
smrštění po 2 dnech	3.43E-05	7.01E-05	5.43E-05	8.76E-05	1.12E-04
smrštění po 3 dnech	1.49E-04	1.24E-04	1.51E-04	2.02E-04	1.55E-04
smrštění po 4 dnech	1.38E-04	1.13E-04	1.17E-04	1.45E-04	1.56E-04
smrštění po 7 dnech	2.35E-04	1.71E-04	2.53E-04	2.64E-04	2.85E-04
smrštění po 11 dnech	3.38E-04	2.45E-04	3.09E-04	3.28E-04	3.07E-04
smrštění po 18 dnech	3.94E-04	3.39E-04	4.19E-04	4.50E-04	4.19E-04
smrštění po 25 dnech	4.31E-04	4.33E-04	4.81E-04	4.69E-04	5.25E-04
smrštění po 28 dnech	4.48E-04	4.02E-04	4.89E-04	4.96E-04	5.25E-04
-					
	Referenční k nasáklému	10 % Recyklát + voda nasáklý	15 % Recyklát + voda nasáklý		
smrštění po 1 dnu	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		
smrštění po 2 dnech	5.59E-05	4.79E-05	1.75E-04		
smrštění po 3 dnech	1.37E-04	6.23E-05	2.13E-04		
smrštění po 4 dnech	1.69E-04	1.27E-04	2.36E-04		
smrštění po 7 dnech	2.37E-04	2.92E-04	3.59E-04		
smrštění po 11 dnech	3.73E-04	3.30E-04	4.27E-04		
smrštění po 18 dnech	4.21E-04	4.09E-04	4.72E-04		
smrštění po 25 dnech	5.12E-04	4.77E-04	4.86E-04		
smrštění po 28 dnech	5.29E-04	4.93E-04	4.96E-04		

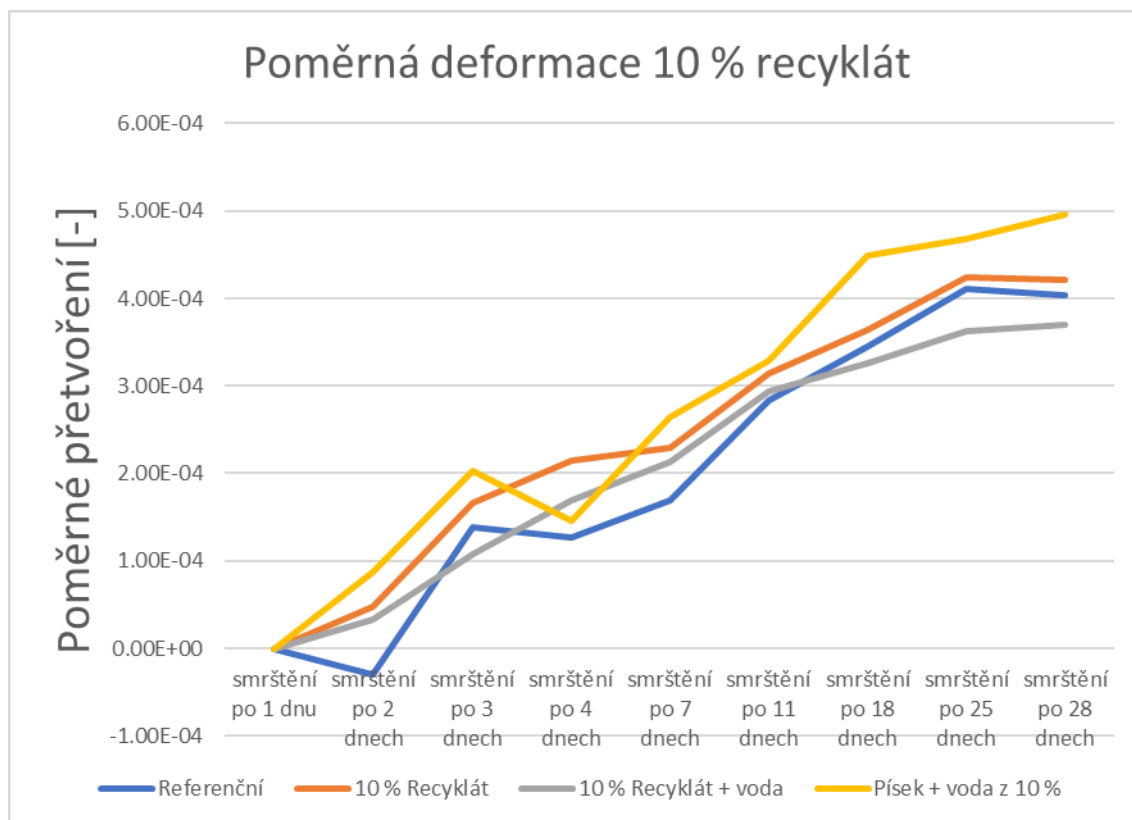
14.1 Smrštění betonů s přidavkem suchého recyklátu

Pro lepší názornost jsou výsledky poměrné deformace jednotlivých receptur prezentovány v grafech 8, 9 a 10. Grafy jsou rozděleny podle obsahu recyklátu a vždy je k nim srovnání s referenční záměsí.



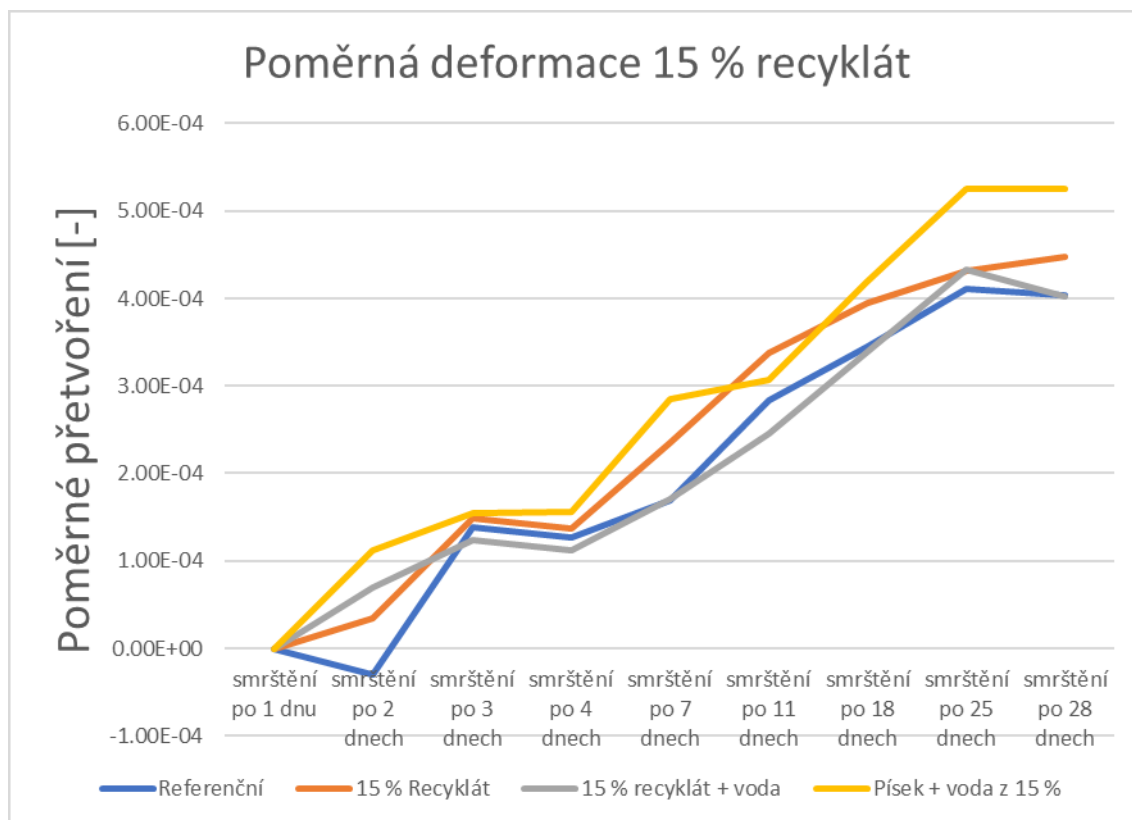
Graf 8: Poměrné smrštění 5 % recyklátu

Jak je z grafu patrné, přidavek recyklátu neměl pozitivní účinek na snížení výsledného smrštění, protože nejmenšího smrštění došlo u referenční záměsí. Avšak v těchto záměsích mohla nastat nějaká chyba, protože dle výsledku pevnosti, které budou prezentovány v další části, došlo k velmi výraznému poklesu pevnosti v tlaku. Výsledek, že nízký přidavek betonového recyklátu zhoršuje výrazně pevnost a navyšuje smrštění betonu se jeví jako nepravděpodobný, vzhledem k tomu, že vyšší dávky recyklátu už neměly výrazný účinek na pevnost betonu.



Graf 9: Poměrné smrštění 10 % recyklátu

Jako jediná ze všech receptur s přidáním recyklátem dosáhla záměs s 10 % recyklátu s přidanou vodou menšího smrštění než referenční záměs. Avšak jako u všech záměsů, je rozptyl výsledků velmi malý a nelze tento pozitivní výsledek potvrdit nebo vyvrátit.

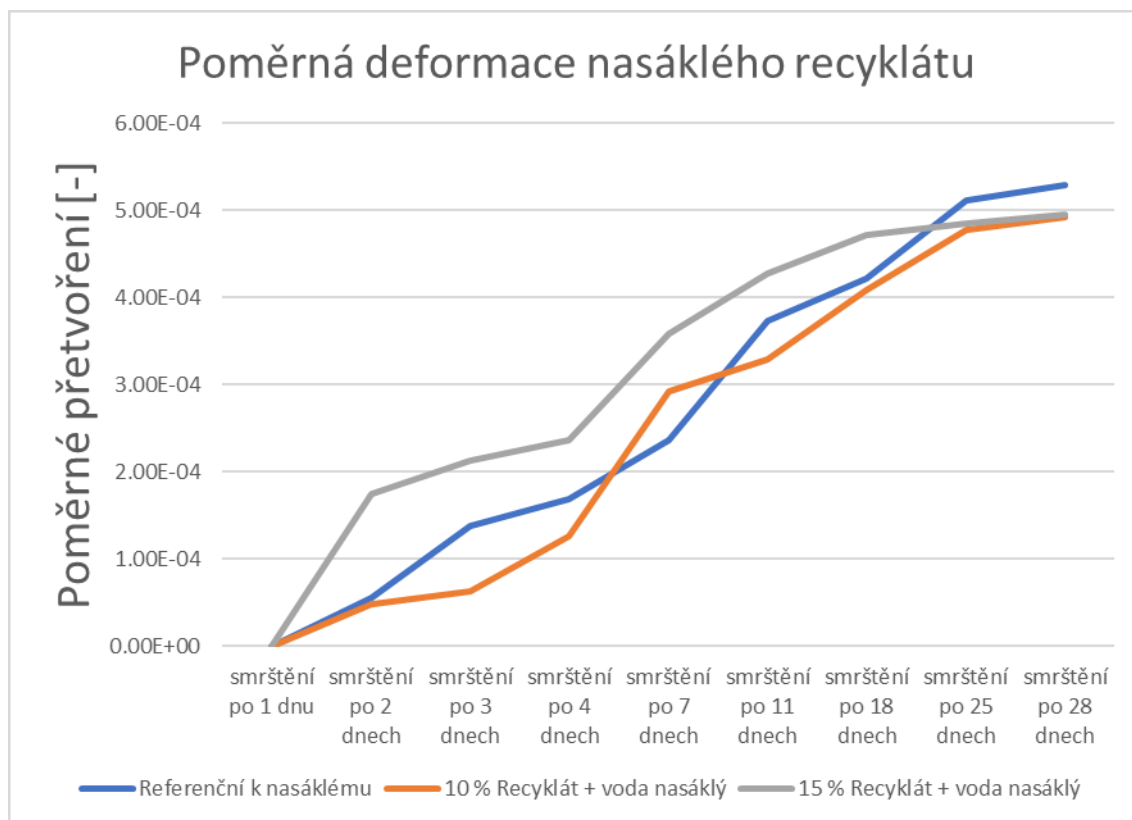


Graf 10: Poměrné smrštění 15 % recyklátu

U záměsi s 15 % recyklátem dodaným o vodu došlo ke stejnému výslednému smrštění jako u referenční záměsi. Opět rozdíly mezi záměsemi jsou velmi malé, a to také potvrzuje výsledek, že nejvyššího smrštění dosáhla receptura s pískem s přidanou vodou. Receptura s pískem a vodou by měla mít určitě menší smrštění než referenční, ale to se dle výsledků nestalo ani u jedné z receptur.

14.2 Smrštění betonů s nasáklým recyklátem

Lépe přehledné výsledky pro receptury s přidáním nasáklým betonovým recyklátem jsou zobrazeny v grafu 11.



Graf 11: Poměrná deformace nasáklého recyklátu

Na rozdíl od použití suchého recyklátu vzorky s nasáklým recyklátem vykázaly nižší hodnoty smrštění. Jenže opět rozdíl není významný, a tedy s jistotou nelze říct, že přidání nasáklého recyklátu má významný vliv na snížení smrštění.

14.3 Vyhodnocení smrštění

Z výsledků měření smrštění je možné konstatovat, že na daných vzorcích měl lepší výsledky předem nasáklý recyklát, ale snížení smrštění nebylo velmi významné, a tedy se nedá s jistotou tvrdit, že použití at' nasáklého nebo suchého recyklátu je výhodné z hlediska snížení výsledného smrštění. Na druhou stranu mohl mít recyklát pozitivní vliv během prvního dne, kdy ještě nezapočalo měření deformací. Příští výzkum by tedy měl směřovat k měření smrštění již od momentu, kdy je betonová směs umístěna do forem. Dále by také v příštím výzkumu bylo vhodné použití jiného betonového recyklátu, například recyklátu s nižší frakcí, který je schopen absorbovat větší množství vody. Nahrazení písku 15 % betonového recyklátu poskytlo teoretické navýšení celkového vodního součinitele z 0,25 na 0,27, což není velmi významné.

15 Pevnost vysokohodnotných betonů

Zkoušky pevnosti byly prováděny na shodných tělesech, na kterých bylo měřeno smrštění. Měření tedy probíhalo na třech trámečkách od každé receptury o rozměrech 40x40x160 mm. V tabulce 12 jsou vyznačeny průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku pro jednotlivé receptury. Výsledné pevnosti jednotlivých receptur lze nalézt v příloze 4. Pro receptury 5 % recyklát a 5 % recyklát + voda je průměrná hodnota pevnosti v tlaku získána pouze z pěti hodnot, protože jedna polovina trámečku od každé záměsi vykázala nestandardní porušení, které bylo navíc o více než 10 % rozdílné oproti průměru, a proto byly tyto poloviny vzorku vyloučeny. Vzorky při zkoušení pevnosti v tlaku byly vždy umístěny do lisu tak, aby se nevyskytoval ocelový hrot pro měření smrštění v tlačném průřezu. Současně v tabulce 12 je také zaznamenána průměrná hodnota objemové hmotnosti jednotlivých receptur získána z objemových hmotností zkoušených těles.

Tabulka 12: Pevnosti vysokohodnotného betonu

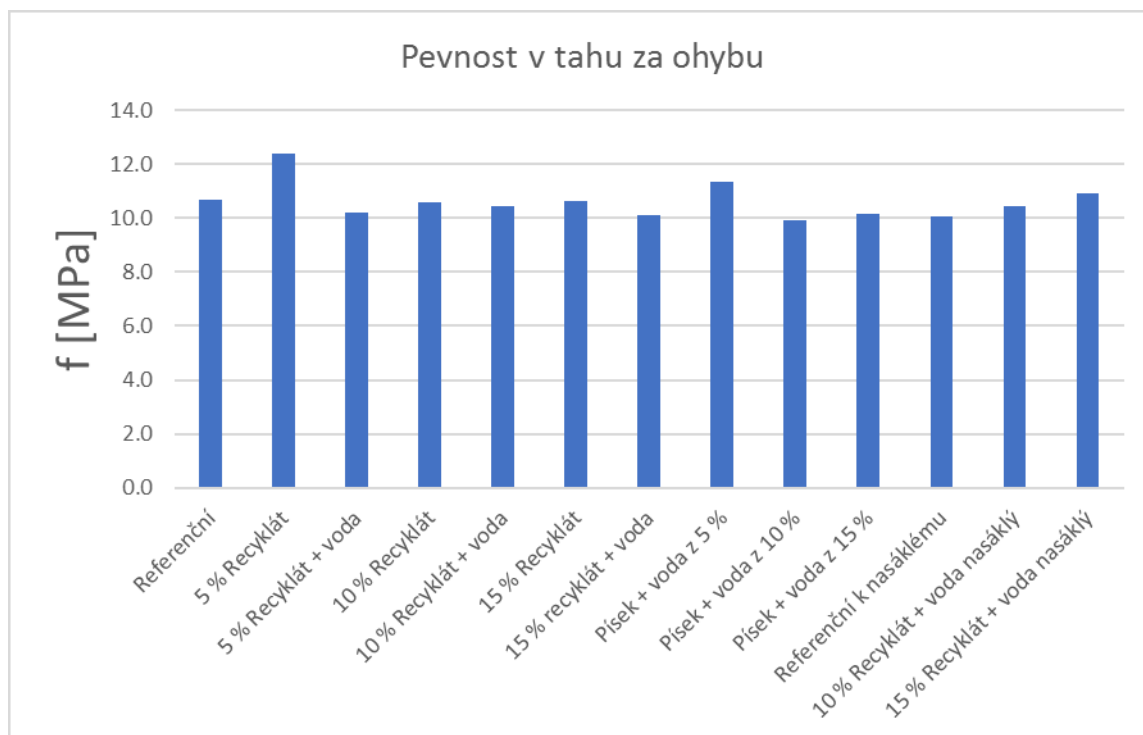
	[MPa]		[kg/m ³]
	Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku	Objemová hmotnost
Referenční	10.7	102.3	2373
5 % Recyklát	12.4	81.2	2374
5 % Recyklát + voda	10.2	81.5	2399
10 % Recyklát	10.6	93.6	2364
10 % Recyklát + voda	10.4	99.3	2385
15 % Recyklát	10.7	88.8	2402
15 % recyklát + voda	10.1	95.7	2385
Písek + voda z 5 %	11.4	69.2	2332
Písek + voda z 10 %	9.9	101.9	2391
Písek + voda z 15 %	10.2	98.3	2333
Referenční k nasáklému	10.1	96.7	2318
10 % Recyklát + voda nasáklý	10.5	96.5	2313
15 % Recyklát + voda nasáklý	10.9	99.3	2294

15.1 Vyhodnocení pevnosti HPC

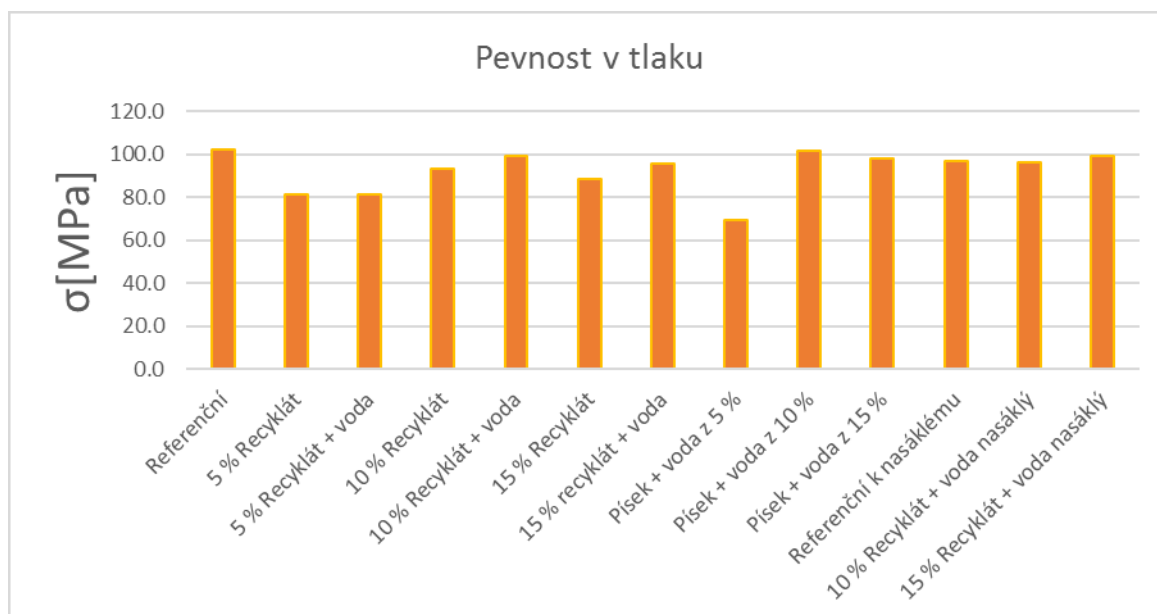
V tabulce 13 jsou vyznačeny procentuální porovnání dosažených průměrných hodnot pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých receptur. Tyto hodnoty jsou vždy vztaženy k referenční záměsi míchané spolu s těmito recepturami. Výsledky průměrných pevností v tahu za ohybu jsou také prezentovány na grafu 12.

Tabulka 13: Procentuální porovnání pevnosti HPC

	[%]	[%]
	Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku
Referenční	100	100
5 % Recyklát	115.73	79.37
5 % Recyklát + voda	95.28	79.64
10 % Recyklát	98.94	91.41
10 % Recyklát + voda	97.68	97.00
15 % Recyklát	99.69	86.75
15 % recyklát + voda	94.69	93.50
Písek + voda z 5 %	106.20	67.65
Písek + voda z 10 %	92.73	99.60
Písek + voda z 15 %	94.96	96.02
Referenční k nasáklému	100.00	100.00
10 % Recyklát + voda nasáklý	104.12	99.86
15 % Recyklát + voda nasáklý	108.78	102.71



Graf 12: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu HPC



Graf 13: Pevnost v tlaku vysokohodnotného betonu

Jak již bylo dříve zmíněno, receptury s obsahem 5 % recyklátu a receptura s pískem s vodou přidanou do 5 % recyklátu dosáhly podobných nebo dokonce vyšších pevností v tahu za ohybu jako referenční záměs, ale pevnost v tlaku byla menší než 80 % referenční záměsi, což je velmi zvláštní a ukazuje to na nějakou chybu.

Ostatní záměsi se suchým recyklátem ve výsledku dosáhly velmi podobných hodnot jako referenční receptura, respektive byly maximálně o 8 % menší. Jedinou výjimku tvoří pevnost v tlaku u receptury s 15 % recyklátem bez dodané vody, kde hodnota klesla na 86 % referenční záměsi. Jedno z těles po zkoušce v tlaku této receptury je vyfoceno na obrázku 8.



Obrázek 8: Těleso z receptury 15 % recyklát po zkoušce pevnosti v tlaku

Výsledky u nasáklého recyklátu ukazují, že díky němu mohlo dojít k navýšení pevnosti v tahu. Pevnosti v tlaku zůstaly prakticky nezměněny. Avšak výsledné hodnoty nejsou výrazně odlišné a nelze tuto skutečnost s jistotou potvrdit.

Z celkových výsledků lze konstatovat, že přídavek suchého betonového recyklátu nemá výrazný vliv na pevnost v tlaku nebo pevnost v tahu za ohybu a u nasáklého betonového recyklátu je to velmi diskutabilní.

16 Závěr

Cílem této práce bylo určit, zda přidání betonového recyklátu do vysokohodnotného betonu jako náhrady kameniva o stejné frakci, má účinky na smršťování betonu a také účinky na výsledné pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku.

Z výsledků analýzy betonového recyklátu frakce 0/4 se zdálo, že jeho použití pro vnitřní ošetřování může přinést snížení smrštění, protože by sloužil jako nositel ošetřovací vody díky své nasákavosti, která byla 21,2 %.

Při porovnání výsledků měření smrštění běžných betonů je vidět, že záměsi s vodním součinitelem 0,3 a 0,4 dosáhly výrazně vyššího smrštění než záměs s $w=0,5$, což potvrzuje, že nižší vodní součinitel zapříčiňuje vyšší smrštění. Nejvyšší smrštění bylo naměřeno u záměsi s vodním součinitelem 0,4. Maximální smrštění by měla dosahovat záměs s vodním součinitelem 0,3, ale ta se z neurčitého důvodu začala smršťovat až 4 den měření, kdežto záměs s $w=0,4$ vykazovala smrštění od počátku měření. Dále byla velmi dobře pozorována důležitost ošetřování, která prakticky zabránila jakémukoliv smrštění a nikterak významně neovlivnila pevnosti.

Z výsledků provedených zkoušek betonu s přidáním suchým betonovým recyklátem se ukázalo, že jeho použití nemá pozitivní vliv na smrštění. Receptura s 10 % recyklátu sice dosáhla menšího smrštění než referenční záměs, ale nejednalo se o významné snížení smrštění.

Při použití nasáklého betonového recyklátu se ukázalo, že by mohl mít mírně snižující účinky na smrštění. Obě receptury s nasáklým recyklátem dosáhly asi o 6 % menšího poměrného smrštění a jejich pevnost v tlaku byla prakticky totožná s referenční recepturou. U pevnosti v tahu došlo k mírnému navýšení asi o 5 % u receptury s přidáním 10 % betonového recyklátu a 8 % u receptury s 15 % přidáním betonového recyklátu. Ale celkově se nedá s jistotou tvrdit, že přidání nasáklého betonového recyklátu má snižující účinky na smrštění, díky použité metodě, která při opakování měření neposkytovala vždy totožné výsledky.

Je možné, že betonový recyklát přinesl snížení smrštění během prvního dne hydratace, kdy ještě nebylo započato s měřením. Tuto skutečnost kvalitativně potvrzuje i to, že

v souběžně probíhajícím výzkumu na ŽPSV a.s. vznikly již během prvního dne smršťovací trhliny na rámovém nosníku. Nosník byl ponechán ve vnitřním bednění a ve vnitřních rozích rámu vznikly smršťovací trhliny

Jako doporučení pro další výzkum by bylo vhodné použít jiné měřicí zařízení, které by umožňovalo sledovat změny objemu již od doby umístění betonu do formy. Tento přístroj bude již brzy po odevzdání této práce na katedře stavebních hmot k dispozici. Dále by bylo také vhodné při příštím výzkumu použít jemnější frakci betonového recyklátu, který je schopen absorbovat větší množství ošetřovací vody.

Seznam použité literatury

1. PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5.
2. COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
3. AITCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. Přeložil Josef KRÁTKÝ, přeložil Ivan SMOLÍK, přeložil Vlastimil BÍLEK. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost (ČBS) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9. NEWMAN, John a Ban Seng CHOO, ed. *Advanced concrete technology: Processes*. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2003. ISBN 0-7506-5105-9.
4. HUDOBA, Igor. *Vysokohodnotný betón: materiály, vlastnosti, výroba, využitie*. V Bratislave: Slovenská technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-227-2836-2.
5. HELA, Rudolf. *Technologie betonu II*. Brno: VUT v Brně, 2007.
6. MORIN, Richard, HADDAD, Gilbert, AITCIN, Pierre-Claude, Crack-Free, High-Performance Concrete Structures, *Concrete international*, 2002, **24**(9), 43-48. ISSN 0162-4075
7. KAMAL, M. M., SAFAN, M. A., BASHANDY, A. A., KHALIL, A. M., Experimental investigation on the behavior of normal strength and high strength self-curing self-compacting concrete, *Journal of Building Engineering*, 2018, **(16)**3, 79-93. ISSN 2352-7102
8. TP 187. Samozhutnitelný beton pro mostní objekty pozemních komunikací. Praha: Ministerstvo dopravy České republiky, 2007.
9. HELA, Rudolf, 2015, Příměsi do betonu, *Beton: technologie, konstrukce, sanace*. [online], **2015**(2) [vid. 2018-11-19]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: <http://www.betontks.cz/sites/default/files/2015-2-04.pdf>
10. Shrinkage Of Concrete: Minimizing/Eliminating The Potential For Cracking [online]. TILT-UP TODAY [vid. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://tilt-up.org/tilt-up>

uptoday/2018/01/27/shrinkage-of-concrete-minimizingeliminating-the-potential-for-cracking/

11. Smršťování betonu [online]. EBETON [vid. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu>
12. Supercement [online]. Cement Hranice a.s. [vid. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://www.cement.cz/online/cz/Domcstrnka/Produkty/CementyBalene/SUPERCEMENT.html>
13. MasterGlenium ACE 300 [online]. BASF. [vid. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.master-builders-solutions.basf.cz/cs-z/products/mastergleniumace/masterglenium-ace-300>
14. Metaver I, M, N [online]. NEWCHEM. [vid. 2018-11-19]. Dostupné z: <http://catalogue.newchem.org/Great%20Britain/product/Metaver%20I%2c%20M%2c%20N/299>
15. ČSN EN 12620+A1. Kamenivo do betonu. Praha: Český normalizační institut, 2008.
16. ČSN EN 933-1. Zkoušení geometrických vlastností kameniva – Část 1: stanovení zrnitosti – síťový rozbor. Praha: Český normalizační institut, 2012.
17. ČSN EN 1097-6. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti. Praha: Český normalizační institut, 2014.
18. ČSN EN 1097-3. Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva. Praha: Český normalizační institut, 2014.
19. ČSN EN 1015-3. Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Praha: Český normalizační institut, 2000.
20. ČSN EN 196-1. Metody zkoušení cementu. Část 1: Stanovení pevnosti. Praha: Český normalizační institut, 2016.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Schéma betonu s nízkým a vysokým vodním součinitelem [3]	11
Obrázek 2: Schématické znázornění smršťování betonu [11].	20
Obrázek 3: Vliv ošetřování na pevnost betonu [2]	22
Obrázek 4: Vliv ošetřování na trvanlivost [2]	23
Obrázek 5: Betonový recyklát DESTRO	30
Obrázek 6: Příložený dilatometr	38
Obrázek 7: Přístroj na měření deformace FORM+TEST	46
Obrázek 8: Těleso z receptury 15 % recyklát po zkoušce pevnosti v tlaku.....	55

Seznam grafů

Graf 1: Křivka zrnitosti betonového recyklátu	31
Graf 2: Přetvoření receptury $w=0,3$	39
Graf 3: Přetvoření receptury $w=0,4$	40
Graf 4: Přetvoření receptury $w=0,5$	40
Graf 5: Porovnání smrštění zabalených těles.....	41
Graf 6: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu běžného betonu	43
Graf 7: Pevnosti v tlaku běžného betonu	43
Graf 8: Poměrné smrštění 5 % recyklátu	48
Graf 9: Poměrné smrštění 10 % recyklátu	49
Graf 10: Poměrné smrštění 15 % recyklátu	50
Graf 11: Poměrná deformace nasáklého recyklátu	51
Graf 12: Průměrné hodnoty pevnosti v tahu za ohybu HPC.....	54
Graf 13: Pevnost v tlaku vysokohodnotného betonu	54

Seznam tabulek

Tabulka 1: Síťový rozbor betonového recyklátu	31
Tabulka 2: Objemová hmotnost a nasákavost betonového recyklátu	32
Tabulka 3: Sypná hmotnost a mezerovitost betonového recyklátu	33
Tabulka 4: Receptura běžného betonu	34
Tabulka 5: Receptura vysokohodnotných betonů	35
Tabulka 6: Receptura vysokohodnotného betonu s předem nasáklým recyklátem	36
Tabulka 7: Poměrné smrštění běžného betonu	38
Tabulka 8: Průměrné hodnoty pevností a objemové hmotnosti běžného betonu	42
Tabulka 9: Rozlití receptur vysokohodnotného betonu	44
Tabulka 10: Hmotnosti vzorků před zabalením a po vybalení	45
Tabulka 11: Průměrné hodnoty poměrné deformace receptur z HPC	47
Tabulka 12: Pevnosti vysokohodnotného betonu	52
Tabulka 13: Procentuální porovnání pevnosti HPC	53

Seznam příloh

Příloha 1: Výsledky smrštění běžného betonu

Příloha 2: Pevnosti běžného betonu

Příloha 3: Výsledky smrštění vysokohodnotného betonu

Příloha 4: Pevnosti vysokohodnotného betonu

Příloha 1: Výsledky smrštění běžného betonu

	w = 0,3	w = 0,4	w = 0,5		w = 0,3	w = 0,4	w = 0,5
smrštění po 2 dnech				smrštění po 11 dnech			
1	122	x	194	1	128	x	212
2	13	141	380	2	25	160	398
3	290	195	x	3	297	219	x
4	123	163	-53	4	115	165	-67
5	149	176	751	5	140	175	741
6	135	130	245	6	133	131	246
smrštění po 3 dnech				smrštění po 18 dnech			
1	123	x	193	1	135	x	207
2	10	145	379	2	31	171	393
3	291	204	x	3	302	226	875
4	125	166	-65	4	114	162	-68
5	150	177	742	5	139	173	739
6	140	130	237	6	131	131	250
smrštění po 4 dnech				smrštění po 25 dnech			
1	120	x	198	1	140	x	200
2	15	153	380	2	37	171	390
3	288	210	x	3	306	225	x
4	123	166	-65	4	105	159	-66
5	151	176	742	5	130	170	737
6	138	130	237	6	120	128	246
smrštění po 7 dnech				smrštění po 28 dnech			
1	132	x	206	1	148	x	198
2	27	161	389	2	44	177	382
3	300	217	x	3	313	232	x
4	122	165	-66	4	104	154	-76
5	148	178	742	5	133	164	730
6	139	132	242	6	119	126	243

Příloha 2: Pevnosti běžného betonu

	[mm]			[kg]	[kN]			[MPa]	
	h	b	l	m	Tah	Tlak		Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku
w = 0,3 zabalené	40.06	40.46	160.00	0.5955	3.86	127.23	120.60	9.05	77.45
	40.00	39.43	160.50	0.5975	4.38	123.21	119.71	10.27	75.91
	40.05	40.02	160.50	0.5890	3.85	128.11	121.27	9.02	77.93
w = 0,3 z vody	40.39	40.21	160.50	0.5995	4.14	119.52	111.42	9.69	72.17
	40.14	39.74	161.00	0.5885	3.86	113.15	111.48	9.06	70.20
	40.04	39.96	161.00	0.5805	3.60	111.98	111.03	8.44	69.69
w = 0,4 zabalené	39.95	40.32	160.50	0.5550	3.76	100.25	99.27	8.81	62.35
	40.23	38.83	160.00	0.5525	3.50	92.18	91.76	8.20	57.48
	40.13	40.40	160.00	0.5695	3.64	93.69	93.83	8.52	58.60
w = 0,4 z vody	40.21	38.96	160.00	0.5600	3.66	100.13	96.93	8.57	61.58
	40.28	39.84	160.00	0.5635	3.18	95.81	89.82	7.46	58.01
	40.13	39.94	160.50	0.5530	2.82	96.00	94.54	6.60	59.54
w = 0,5 zabalené	40.26	40.06	160.50	0.5520	2.90	73.08	71.52	6.80	45.19
	39.96	39.36	161.00	0.5505	3.16	73.41	68.18	7.40	44.25
	40.28	40.29	161.00	0.5485	2.97	75.88	71.38	6.97	46.02
w = 0,5 z vody	39.96	39.91	161.00	0.5740	3.20	73.58	75.79	7.50	46.68
	40.27	39.13	161.00	0.5610	3.10	73.62	73.54	7.27	45.99
	40.40	41.26	160.00	0.5690	2.95	77.76	81.85	6.92	49.88

Příloha 3: Výsledky smrštění vysokohodnotného betonu

	Referenční					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	2.187	-2.188	-2.007	-2.007	-1.570	-1.584
	-					
smrštění po 2 dnech	2.220	-2.215	-2.015	-2.016	-1.547	-1.561
	-					
smrštění po 3 dnech	2.169	-2.172	-1.965	-1.962	-1.555	-1.576
	-					
smrštění po 4 dnech	2.181	-2.185	-1.990	-1.969	-1.545	-1.540
	-					
smrštění po 7 dnech	2.166	-2.170	-1.964	-1.969	-1.559	-1.538
	-					
smrštění po 11 dnech	2.150	-2.160	-1.954	-1.952	-1.517	-1.514
	-					
smrštění po 18 dnech	2.137	-2.137	-1.948	-1.947	-1.506	-1.507
	-					
smrštění po 25 dnech	2.117	-2.119	-1.941	-1.940	-1.495	-1.501
	-					
smrštění po 28 dnech	2.125	-2.127	-1.941	-1.933	-1.498	-1.497
	5 % Recyklát					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	2.800	-2.856	-2.368	-2.369	-2.872	-2.876
	-					
smrštění po 2 dnech	2.787	-2.781	-2.351	-2.368	-2.843	-2.863
	-					
smrštění po 3 dnech	2.782	-2.790	-2.337	-2.337	-2.822	-2.830
	-					
smrštění po 4 dnech	2.794	-2.788	-2.334	-2.340	-2.821	-2.830
	-					
smrštění po 7 dnech	2.774	-2.773	-2.323	-2.311	-2.819	-2.825
	-					
smrštění po 11 dnech	2.748	-2.746	-2.309	-2.298	-2.819	-2.819
	-					
smrštění po 18 dnech	2.753	-2.759	-2.297	-2.291	-2.809	-2.818
	-					
smrštění po 25 dnech	2.731	-2.740	-2.292	-2.288	-2.790	-2.793
	-					
smrštění po 28 dnech	2.733	-2.726	-2.282	-2.272	-2.783	-2.792

	5 % Recyklát + voda					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	2.249	-2.248	-2.286	-2.304	-1.458	-1.439
	-					
smrštění po 2 dnech	2.233	-2.233	-2.280	-2.270	-1.434	-1.417
	-					
smrštění po 3 dnech	2.205	-2.195	-2.259	-2.271	-1.409	-1.400
	-					
smrštění po 4 dnech	2.204	-2.205	-2.250	-2.252	-1.388	-1.388
	-					
smrštění po 7 dnech	2.200	-2.192	-2.243	-2.250	-1.391	-1.392
	-					
smrštění po 11 dnech	2.183	-2.190	-2.239	-2.235	-1.401	-1.394
	-					
smrštění po 18 dnech	2.181	-2.187	-2.230	-2.227	-1.374	-1.373
	-					
smrštění po 25 dnech	2.175	-2.169	-2.208	-2.216	-1.366	-1.355
	-					
smrštění po 28 dnech	2.171	-2.169	-2.211	-2.217	-1.349	-1.346
	10 % Recyklát					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	0.199	-0.170	0.353	0.338	0.302	0.316
	-					
smrštění po 2 dnech	0.161	-0.158	0.342	0.345	0.307	0.315
	-					
smrštění po 3 dnech	0.141	-0.141	0.380	0.350	0.324	0.343
	-					
smrštění po 4 dnech	0.121	-0.123	0.374	0.385	0.331	0.320
	-					
smrštění po 7 dnech	0.127	-0.135	0.380	0.372	0.341	0.352
	-					
smrštění po 11 dnech	0.116	-0.111	0.399	0.407	0.341	0.352
	-					
smrštění po 18 dnech	0.107	-0.105	0.409	0.407	0.359	0.361
	-					
smrštění po 25 dnech	0.105	-0.104	0.411	0.419	0.383	0.384
	-					
smrštění po 28 dnech	0.090	-0.095	0.410	0.413	0.375	0.372

	10 % Recyklát + voda					
	1		2		3	
smrštění po 1 dnu	-	0.861	-0.855	-2.605	-2.616	-0.890
smrštění po 2 dnech	-	0.868	-0.856	-2.596	-2.607	-0.890
smrštění po 3 dnech	-	0.870	-0.858	-2.570	-2.579	-0.873
smrštění po 4 dnech	-	0.829	-0.831	-2.587	-2.569	-0.863
smrštění po 7 dnech	-	0.817	-0.818	-2.586	-2.572	-0.851
smrštění po 11 dnech	-	0.810	-0.809	-2.558	-2.549	-0.842
smrštění po 18 dnech	-	0.802	-0.811	-2.555	-2.550	-0.827
smrštění po 25 dnech	-	0.787	-0.783	-2.557	-2.545	-0.833
smrštění po 28 dnech	-	0.804	-0.809	-2.543	-2.539	-0.817
	15 % Recyklát					
	1		2		3	
smrštění po 1 dnu	-	2.888	-2.895	-0.954	-0.959	-0.423
smrštění po 2 dnech	-	2.886	-2.890	-0.941	-0.952	-0.424
smrštění po 3 dnech	-	2.863	-2.880	-0.919	-0.917	-0.400
smrštění po 4 dnech	-	2.858	-2.859	-0.945	-0.946	-0.396
smrštění po 7 dnech	-	2.851	-2.850	-0.917	-0.917	-0.370
smrštění po 11 dnech	-	2.831	-2.829	-0.900	-0.891	-0.365
smrštění po 18 dnech	-	2.819	-2.826	-0.880	-0.885	-0.360
smrštění po 25 dnech	-	2.820	-2.821	-0.878	-0.878	-0.343
smrštění po 28 dnech	-	2.808	-2.809	-0.886	-0.883	-0.338

	15 % recyklát + voda					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	0.300	-0.270	0.285	0.283	0.204	0.211
	-					
smrštění po 2 dnech	0.279	-0.250	0.300	0.300	0.212	0.204
	-					
smrštění po 3 dnech	0.252	-0.271	0.291	0.312	0.234	0.230
	-					
smrštění po 4 dnech	0.265	-0.263	0.305	0.317	0.222	0.216
	-					
smrštění po 7 dnech	0.256	-0.258	0.319	0.320	0.230	0.239
	-					
smrštění po 11 dnech	0.233	-0.241	0.323	0.330	0.247	0.246
	-					
smrštění po 18 dnech	0.218	-0.217	0.347	0.341	0.261	0.257
	-					
smrštění po 25 dnech	0.203	-0.208	0.354	0.352	0.285	0.290
	-					
smrštění po 28 dnech	0.207	-0.215	0.360	0.351	0.274	0.275
	Písek + voda z 5 %					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	0.456	-0.452	-3.311	-3.304	-0.975	-0.971
	-					
smrštění po 2 dnech	0.443	-0.444	-3.304	-3.301	-0.960	-0.960
	-					
smrštění po 3 dnech	0.432	-0.431	-3.281	-3.284	-0.937	-0.946
	-					
smrštění po 4 dnech	0.438	-0.428	-3.290	-3.294	-0.948	-0.948
	-					
smrštění po 7 dnech	0.407	-0.404	-3.269	-3.268	-0.924	-0.932
	-					
smrštění po 11 dnech	0.391	-0.397	-3.262	-3.254	-0.918	-0.923
	-					
smrštění po 18 dnech	0.373	-0.369	-3.246	-3.255	-0.889	-0.898
	-					
smrštění po 25 dnech	0.373	-0.363	-3.222	-3.234	-0.882	-0.891
	-					
smrštění po 28 dnech	0.368	-0.360	-3.220	-3.234	-0.882	-0.893

	Písek + voda z 10 %					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	2.559	-2.569	-2.969	-2.967	-3.108	-3.114
	-					
smrštění po 2 dnech	2.550	-2.554	-2.963	-2.960	-3.084	-3.084
	-					
smrštění po 3 dnech	2.535	-2.549	-2.944	-2.932	-3.060	-3.056
	-					
smrštění po 4 dnech	2.540	-2.538	-2.948	-2.948	-3.082	-3.079
	-					
smrštění po 7 dnech	2.527	-2.531	-2.927	-2.927	-3.052	-3.048
	-					
smrštění po 11 dnech	2.502	-2.502	-2.923	-2.926	-3.049	-3.043
	-					
smrštění po 18 dnech	2.478	-2.479	-2.902	-2.895	-3.035	-3.030
	-					
smrštění po 25 dnech	2.469	-2.466	-2.905	-2.892	-3.030	-3.037
	-					
smrštění po 28 dnech	2.484	-2.473	-2.883	-2.886	-3.019	-3.026
	Písek + voda z 15 %					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	0.096	-0.100	0.152	0.157	0.132	0.129
	-					
smrštění po 2 dnech	0.076	-0.080	0.179	0.165	0.151	0.153
	-					
smrštění po 3 dnech	0.076	-0.072	0.185	0.172	0.168	0.161
	-					
smrštění po 4 dnech	0.068	-0.074	0.184	0.186	0.154	0.157
	-					
smrštění po 7 dnech	0.038	-0.041	0.195	0.192	0.188	0.179
	-					
smrštění po 11 dnech	0.041	-0.049	0.208	0.199	0.191	0.190
	-					
smrštění po 18 dnech	0.025	-0.018	0.226	0.224	0.205	0.205
	-					
smrštění po 25 dnech	0.015	-0.006	0.253	0.250	0.220	0.227
	-					
smrštění po 28 dnech	0.018	-0.007	0.254	0.252	0.221	0.227

	Referenční k nasáklému					
	1		2		3	
smrštění po 1 dnu	0.144	0.155	-0.160	-0.170	0.230	0.238
smrštění po 2 dnech	0.169	0.174	-0.151	-0.154	0.229	0.229
smrštění po 3 dnech	0.185	0.186	-0.136	-0.139	0.243	0.243
smrštění po 4 dnech	0.195	0.195	-0.126	-0.130	0.242	0.239
smrštění po 7 dnech	0.208	0.200	-0.121	-0.131	0.264	0.267
smrštění po 11 dnech	0.227	0.234	-0.098	-0.097	0.283	0.282
smrštění po 18 dnech	0.235	0.243	-0.090	-0.090	0.291	0.293
smrštění po 25 dnech	0.261	0.250	-0.076	-0.079	0.310	0.312
smrštění po 28 dnech	0.249	0.260	-0.070	-0.071	0.313	0.315
	10 % Recyklát + voda nasáklý					
	1		2		3	
smrštění po 1 dnu	- 2.616	-2.620	-2.083	-2.087	-1.652	-1.645
smrštění po 2 dnech	- 2.613	-2.609	-2.077	-2.081	-1.642	-1.631
smrštění po 3 dnech	- 2.612	-2.605	-2.074	-2.075	-1.641	-1.631
smrštění po 4 dnech	- 2.591	-2.598	-2.059	-2.065	-1.624	-1.634
smrštění po 7 dnech	- 2.566	-2.570	-2.034	-2.043	-1.585	-1.600
smrštění po 11 dnech	- 2.567	-2.563	-2.033	-2.036	-1.572	-1.588
smrštění po 18 dnech	- 2.546	-2.540	-2.025	-2.020	-1.565	-1.580
smrštění po 25 dnech	- 2.525	-2.525	-2.017	-2.007	-1.559	-1.572
smrštění po 28 dnech	- 2.520	-2.521	-2.010	-2.009	-1.560	-1.569

	15 % Recyklát + voda nasáklý					
	1		2		3	
	-					
smrštění po 1 dnu	3.172	-3.174	-0.399	-0.408	-1.176	-1.174
	-					
smrštění po 2 dnech	3.141	-3.145	-0.375	-0.377	-1.144	-1.138
	-					
smrštění po 3 dnech	3.139	-3.135	-0.365	-0.370	-1.134	-1.137
	-					
smrštění po 4 dnech	3.139	-3.135	-0.351	-0.358	-1.138	-1.135
	-					
smrštění po 7 dnech	3.101	-3.095	-0.363	-0.348	-1.110	-1.111
	-					
smrštění po 11 dnech	3.097	-3.091	-0.350	-0.340	-1.093	-1.085
	-					
smrštění po 18 dnech	3.090	-3.085	-0.330	-0.336	-1.085	-1.083
	-					
smrštění po 25 dnech	3.089	-3.082	-0.332	-0.335	-1.077	-1.080
	-					
smrštění po 28 dnech	3.087	-3.080	-0.332	-0.330	-1.075	-1.080

Příloha 4: Pevnosti vysokohodnotného betonu

		[mm]			[kg]	[kN]			[MPa]	
	Označení vzorku	h	b	l	m	Tah	Tlak		Pevnost v tahu za ohybu	Pevnost v tlaku
Referenční	1	39.91	39.80	160.00	0.6100	4.35	166.12	158.55	10.19	101.46
	2	40.03	40.78	160.50	0.6200	5.04	165.96	167.68	11.81	104.26
	3	40.61	41.02	160.00	0.6270	4.30	169.24	155.00	10.08	101.33
5 % Recyklát	1	40.52	40.88	160.00	0.6230	4.99	101.19	128.63	11.69	71.82
	2	40.05	40.44	160.00	0.6180	5.52	112.25	143.44	12.94	79.90
	3	40.09	40.28	160.00	0.6170	5.33	140.34	126.59	12.49	83.42
5 % Recyklát + voda	1	40.20	40.04	160.00	0.6240	4.27	134.77	134.94	10.00	84.28
	2	40.70	39.73	160.50	0.6160	4.49	114.17	111.49	10.53	70.52
	3	40.18	40.22	160.00	0.6210	4.28	143.56	101.41	10.03	76.55
10 % Recyklát	1	39.98	40.12	160.00	0.6070	4.21	148.70	151.86	9.87	93.93
	2	40.17	40.21	161.00	0.6100	4.88	152.71	146.72	11.43	93.57
	3	39.79	39.91	160.00	0.6050	4.45	152.93	145.26	10.43	93.18
10 % Recyklát + voda	1	40.11	39.04	160.00	0.6060	4.71	161.28	164.45	11.03	101.79
	2	40.23	41.39	160.50	0.6180	4.44	151.49	151.49	10.40	94.68
	3	39.91	39.42	160.00	0.6100	4.23	162.17	162.17	9.90	101.36
15 % Recyklát	1	40.11	40.97	160.00	0.6260	4.65	137.33	142.53	10.90	87.46
	2	39.82	39.16	160.50	0.6140	4.33	141.30	147.21	10.14	90.16
	3	40.26	40.76	160.00	0.6230	4.67	148.37	135.60	10.93	88.74
15 % recyklát + voda	1	40.32	40.89	160.00	0.6250	4.34	147.65	149.15	10.16	92.75
	2	39.88	40.22	160.00	0.6090	4.30	152.30	158.57	10.08	97.15
	3	40.16	40.26	161.00	0.6280	4.32	158.57	152.46	10.13	97.20
Písek + voda z 5 %	1	40.56	40.87	160.00	0.6060	4.69	106.58	118.30	10.99	70.28
	2	40.17	40.86	160.50	0.6140	4.90	109.43	113.82	11.49	69.77
	3	40.20	39.26	160.00	0.6010	4.94	109.28	107.25	11.58	67.67
Písek + voda z 10 %	1	40.15	39.91	160.00	0.6200	4.36	161.23	176.23	10.21	105.46
	2	40.07	40.41	160.00	0.6090	3.93	167.25	146.39	9.20	98.01
	3	40.25	39.55	161.00	0.6160	4.40	161.28	166.21	10.32	102.34
Písek + voda z 15 %	1	40.23	39.92	160.00	0.6000	4.65	149.68	157.26	10.91	95.92
	2	39.82	41.05	160.50	0.6080	4.23	164.27	162.67	9.92	102.17
	3	40.18	39.85	160.00	0.6010	4.11	154.84	154.73	9.63	96.74
Referenční k nasáklému	1	40.86	40.21	160.00	0.6020	4.53	137.70	153.76	10.61	91.08
	2	40.64	40.12	160.00	0.6010	4.76	169.18	156.43	11.16	101.75
	3	40.50	40.88	160.50	0.6080	4.71	166.99	169.03	11.04	105.01
10 % Recyklát + voda nasáklý	1	40.43	40.77	160.00	0.6200	4.62	157.54	154.91	10.84	97.64
	2	39.91	41.36	160.50	0.6150	4.08	153.10	145.53	9.57	93.32
	3	40.42	41.51	160.00	0.6180	4.28	148.82	147.70	10.04	92.66
15 % Recyklát + voda nasáklý	1	40.27	40.46	160.50	0.6080	4.49	149.41	152.87	10.53	94.46
	2	40.70	39.81	160.50	0.5970	4.24	151.11	164.60	9.93	98.66
	3	40.25	40.84	160.00	0.6150	3.93	153.81	151.10	9.20	95.28